



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la recherche scientifique



Université Abderrahmane Mira Bejaïa
Faculté de Technologie
Département de Génie des Procédés
Mémoire de fin de cycle
Pour l'obtention du diplôme de Master
Filière : Génie des procédés
Option : Génie des polymères

Thème

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

Réalisé par :

M^{lle} KHALDI Amel

M^{lle} BENSMAIL Silia

Soutenu le 07 /10/2021 devant un jury composé de :

Dr. DEHOUCHE Nadjat

Présidente

Dr. ZAIDI Lynda

Examinatrice

Dr. BAOUZ Touffik

Encadreur

Année Universitaire :2020-2021

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer nos vifs

Remerciements à notre promoteur

M.BAOUZ Touffik Pour *l'*aide très précieuse et sa

Contribution à *l'*accomplissement de ce travail dans les

Meilleures conditions, avec notre immense gratitude et nous

Sincères respects.

Nos remerciements vont également à tous ceux qui ont

Contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Aux membres du jury qui nous ferons *l'*honneur d'examiner ce
travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes parents

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, son amour, son soutien, tous les
Sacrifices consentes et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa
présence dans ma vie

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de
sacrifices et de privation pour m'aider à avancer dans la vie

A mes chères sœurs : Nassima, Silia et Rabiha

A mes frères : Abdalghani, Arbi, Hamza et Mouloud

A mon binôme et toute mes amis, et tous les personnes pour lesquelles j'ai
une place dans leur cœur

AMEL

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes parents

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privation pour m'aider à avancer dans la vie

A mes chères sœurs : Nassima, Kenza, Siham, Selma et sélina

A mes frères : Samir, Elyes, Halim

A mon fiancé oualid et toute sa famille

A mon binôme et toute mes amis, et tous les personnes pour lesquelles j'ai une place dans leur cœur

Table des matières

Introduction	1
Chapitre I : Généralité sur les plastiques.....	4
I.1. Les matières plastiques.....	4
I.1.1 Définition.....	4
I.1.2. Les familles des matières plastiques.....	5
I.1.3. Les différentes catégories des plastiques.....	6
I.1.3.1. Les plastiques techniques.....	6
I.1.3.2. Les plastiques d'usage courant.....	6
I.1.3.3. Les plastique à haute performance.....	6
I.1.4. Propriétés des matières plastiques.....	7
I.1.5. Domaine d'application des matières plastique.....	7
I.2. Les déchets plastiques.....	9
I.2.1. Définition.....	9
I.2.2. Classification des déchets plastique.....	9
I.2.2.1 Les déchets plastiques industriels.....	9
I.2.2.2. Les déchets plastiques de post-consommation.....	9
I.2.2.3. Les déchets ménagers.....	9
I.2.2.4. Les déchets agricoles.....	9
I.2.2.5. Les déchets électriques et électroniques.....	10
I.2.2.6. Les déchets du bâtiment et des travaux publics.....	10
I.2.2.7. Les déchets commerciaux ou de distributions.....	10
I.3.La pollution plastique.....	10
I.3.1. Typologie de pollutions par le plastique.....	10
I.3.2. Impact des déchets plastiques sur l'environnement et la santé public.....	11
I.3.2.1. Impact des déchets plastique sur la santé publique.....	11
I.3.2.2. Impact des déchets plastique sur l'environnement.....	11
I.3.3. Lutte contre la pollution par les plastiques.....	12
Chapitre II : Déchets d'équipement électrique et électronique(DEEE).....	13
Introduction.....	13
II.1. Définition DEEE.....	13

II.2. Les catégories des DEEE.....	14
II.3. Composition des déchets DEEE.....	14
II.4. L'impact des DEEE.....	15
II.5. Pourquoi gérer les DEEE.....	15
II.6. Répartition des DEEE par type de polymères.....	16
II.7. Stratégies de traitement des DEEE.....	16
II.7.1. Cycle de vie d'un produit.....	16
II.7.2. Réparation.....	16
II.7.3. Révision.....	16
II.7.4. Réusinage (rénovation, reconstitution)	17
II.7.5. Recyclage des DEEE.....	17
État d'art de récupération des DEEE.....	18
Chapitre III : Revalorisation des déchets plastique styréniques issus des DEEE.....	21
Introduction.....	21
III.1. Les différentes méthodes de valorisation des déchets plastiques.....	21
III.1.1. Valorisation énergétique.....	21
III.1.2. Recyclage chimique.....	21
III.1.3. Recyclage mécanique.....	22
III.1.4. Recyclage sous forme de mélanges de déchets de polymères.....	23
III.2. Les stratégies de revalorisation des polymères recyclés.....	24
III.2.1. La stratégie de restabilisation.....	24
III.2.2. La stratégie de dopage	25
III.2.3. La stratégie de valorisation par voie de mélanges	25
III.3. Présentation des polymères valorisés.....	26
III.3.1 Polycarbonate.....	26
III.3.1.1. Présentation du PC.....	26
III.3.1.2. Synthèse du PC.....	26
III.3.1.3. Mise en œuvre.....	27
III.3.1.4. Le marché du PC.....	28
III.3.1.5. Les Propriétés du PC.....	29
III.3.1.5.1. Propriétés physiques.....	29
III.3.1.5.2. Propriétés Mécaniques.....	29
III.3.1.5.3. Propriétés Chimiques.....	29

III.3.1.5.4. Propriétés électriques.....	29
III.3.1.5.5. Les propriétés thermiques.....	30
III.3.1.5.6. Propriétés dimensionnelle.....	30
III.3.2. Présentation de l'ABS.....	30
III.3.2.1. Définition de l'ABS.....	30
III.3.2.2. Structure l'ABS	30
III.3.2.3. Synthèse de l'ABS	31
III.3.2.4. Caractéristiques mécaniques et physicochimiques de L'ABS.....	31
III.3.2.5. Mises en œuvre d'ABS.....	33
Chapitre IV : Revu bibliographique.....	34
Chapitre V : Études sur les mélanges PC/ABS.....	44
V.1. Matériaux utilisée.....	44
V.2. Préparation du mélange de PC/ABS.....	44
V.3. Observations morphologiques.....	45
V.4. Propriétés mécaniques.....	45
V.5. Propriétés thermiques.....	45
V.6. Propriétés rhéologiques.....	45
V.7. Résultats et discussion.....	46
V.7.1. Morphologie.....	46
V.7.2. Propriétés mécaniques.....	47
V.7.3. Comportement de phase.....	50
V.7.4. Stabilité thermique du mélange PC / ABS.....	52
V.7.5. Propriétés rhéologiques.....	54
Conclusion.....	56

Listes d'abréviations

ABS : Acrylonitrile butadiène styrène.

ABS-g-MAH : Anhydride maléique greffe à acrylonitrile butadiène styrène.

ADM : Analyse dynamique mécanique.

ADTM : Analyse dynamiques thermique mécanique.

AN : Acrylonitrile.

ASTM : American Society for Testing and Materials.

ATG : Analyse thermogravimétrique.

CD : Compact Disc.

CFC : Chlorofluorocarbure.

CO₂ : Dioxyde de carbone.

CFC : Chlorofluorocarbure.

DEEE : Déchets des équipements électriques et électroniques.

DSC : Analyse calorimétrie différentielle.

DSM : Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux.

DVD : Digital Versatile Disc.

EEE : Équipements électriques et électroniques.

EPDM : Éthylène propylène et diène monomère.

EVA-g-MA : Anhydride maléique greffé a ethylene acétate de vinyle.

IRTF : Spectroscopie infrarouge a transformée de Fourier.

GMA : Glycidyle méthacrylate.

HBr : Bromure hydrogène.

HCl : Acide chlorhydrique.

HDT : Température de fléchissement sous charge.

HIPS : Polystyrène au choc.

IEM : Interférence électromagnétique.

IFC : Indice de fluidité a chaude.

MAH : Anhydride maléique.

MEB : Microscopie électronique a balayage.

MBS : Méthacrylate butadiène styrène.

MET : Microscopie électronique à transmission.

MMA : Méthacrylate de méthyle.

MWNT : Nanotubes de carbone à parois multiples.

NaOH : Hydroxyle de sodium.

OH : Hydroxyle.

PA : Polyamide.

PB : Polybutadiène.

PC : Polycarbonate.

PCL : Polycaprolactone.

PE : Polyéthylène.

PET : Polyéthylène téréphtalate.

PMMA : Polyméthacrylate de méthyle.

PP : Polypropylène.

PP-g-MAH : Polypropylène greffé d'anhydride maléique.

PS : Polystyrène.

PU : Polyuréthane.

PVC : Polychlorure de vinyle.

PPO : Polyphénylène oxyde.

REP : Filière a responsabilité élargie du producteur.

RoHS : Restriction de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques.

SAG : Styrène acrylonitrile glycidyle.

SAM : Styrène anhydride maléique.

SAN : Styrene acrylonitrile.

SAN-g-PC : Polycarbonate -g-styrène acrylonitrile.

SEBS : Styrène éthylène butylène styrène.

SEB-g-MAH : Styrène éthylène butylène greffé par l'anhydride maléique.

SPMIMA : Styrène phényle maléimide anhydride maléique.

UV : Ultra-violet.

Tf : Temperature finale.

Ti : Temperature initiale.

Tg : Temperature de transition vitreuse.

THF : Tétrahydrofurane.

TFC : Temperature de fléchissement sous charge.

USA : États- Unis.

η^* : viscosité complexe.

Listes des figures

Figure I.1 : Exemples de produits faits de matières plastiques.....	4
Figure I.2 : Exemples d'un produit fait de matière thermodurcissable.....	5
Figure I.3 : Exemples de produits faits de matières thermoplastique.....	5
Figure I.4 : Pneumatique produits à partir d'élastomère.....	6
Figure I.5 : Exemples d'application des matières plastiques,(a) :emballage,(b) : construction,(c) : mobilité et transport,(d) : électronique,(e) : agriculture,(f) : Soins et santé,(g) : sport et loisirs,(h) : énergie.....	8
Figure I.6 : Pollution plastique sur des plantes.....	10
Figure II .1 : Déchets d'équipement électrique et électronique.....	13
Figure II.2 : Composition (en masse) des DEEE traités.....	14
Figure II.3 : Répartition des DEEE par types de polymères.....	16
Figure II.4 : Conception d'une boucle fermée par la réparation, la remise à neuf et le recyclage.....	17
Figure III .1 : Plages de températures de mise en œuvre des principaux plastiques.....	24
Figure III.2 : Synthèse de polycarbonate de bisphénol A.....	26
Figure III.3 : Schéma de synthèse du PC par polycondensation du Bisphénol A (BPA) avec le Phosgène.....	27
Figure III.4 : schéma de synthèse du PC par transesterification.....	27
Figure III.5 : l'évolution de la consommation du PC entre (1990-2005).....	28
Figure III.6 : Répartition de la consommation du PC par secteur d'activités.....	28
Figure III .7 :formule chimique de l'unité répétitive l'ABS.....	31
Figure V.1 : Micrographies MEB de (a) PC80, (b) PC60, (c) PC40, (d) PC80S1, (e) PC60S1 et (f) Les mélanges PC40S1.....	47
Figure V.2 :Propriétés de traction des mélanges PC / ABS sans et avec le comptabilisant SEBS-g-MAH comme fonction du contenu du PC.....	49
Figure V.3 :Résistance aux chocs Izod entaillée des mélanges PC / ABS sans et avec SEBS-g-MAH comptabiliser en fonction du contenu du PC.....	50
Figure.V.4 . Courbes ATG du PC pur, de l'ABS et du PC / ABS sans et avec 1% en poids de comptabilisant.....	52
Figure V.5 . Viscosité complexe, η^* , en fonction de la fréquence pour les composants purs, PC40, PC60 et PC80 mélange sans et avec 1% en poids de comptabilisant à 250°C.....	55

Liste des tableaux

Tableau III.1. : Propriétés mécaniques du PC.....	29
Tableau V.1. : Propriétés mécaniques des mélanges (PC / ABS) non compatibles.....	48
Tableau V.2. :Températures de transition vitreuse Tg en (° C), des mélanges PC, ABS, PC40, PC60 et PC80, sans et avec comptabilisant, tel qu'obtenu par DSC et AMD.....	51
Tableau.V.3. : Données ATG des mélanges PC, ABS et PC/ABS sans et avec comptabiliser.....	53

Introduction

La forte croissance de la production des équipements électriques et électroniques et leur faible durée de vie entraînent une augmentation du volume des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). En raison de la présence de substances dangereuses contenues dans les DEEE, leur fin de vie peut entraîner des problèmes environnementaux s'ils ne sont pas correctement traités. Afin de répondre à cette problématique, des directives européennes ont été instaurées avec pour objectif de réglementer la collecte, le traitement et de promouvoir le recyclage et la valorisation des matières composant les DEEE. La réglementation, traduite en droit Français en 2006, fixe des objectifs différenciés à atteindre pour les catégories des DEEE, notamment en termes de taux de recyclage matière : 65% et de valorisation : 75%. Par ailleurs, une augmentation régulière de ces objectifs initiaux de 5% est prévue. Parallèlement, les DEEE contiennent environ 20% en masse de polymères qui sont aujourd'hui très peu recyclés. Les fournisseurs d'équipements électriques et électroniques (EEE) doivent donc se préoccuper de la fin de vie de leurs produits et s'intéressent à la création d'une filière du recyclage des plastiques qui les composent pour satisfaire les réglementations [1].

La mise en place d'une filière de recyclage des polymères issus des DEEE ne sera pas immédiate car cela demande au préalable la levée de certains verrous scientifiques. Le gisement de DEEE est composé d'environ une dizaine de polymères différents. Avec les méthodes de tri actuelles post-broyage, il est particulièrement difficile d'assurer une séparation idéale et donc d'avoir un polymère exempt d'impuretés pour son recyclage. Les contraintes liées au gisement (fluctuation, grades différents) et au procédé de remise en forme (extrusion et injection) doivent également être prises en compte. Il existe alors principalement deux principaux verrous technologiques à lever. Le premier consiste à limiter les effets des impuretés sur les propriétés mécaniques de la matière recyclée. Le second est d'homogénéiser les caractéristiques mécaniques de la matière recyclée malgré les fluctuations du gisement [1].

Parmi les polymères présents dans les DEEE, certains font partie de la famille des polymères dits « techniques ». Il s'agit, de l'acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS), du polystyrène choc (HIPS, High impact polystyrène en anglais) et du polycarbonate/ acrylonitrile-butadiène-styrène (PC/ABS). Nous avons choisi dans ce mémoire d'étudier le recyclage de l'ABS dans le PC comme agent modifiant de choc pour plusieurs raisons afin de préparer un mélange technique pour des applications ciblées. Ce matériau possède de très bonnes propriétés mécaniques et c'est un alliage dont la composition peut être ajustée pour maîtriser certaines de ses caractéristiques. De plus, l'ABS ignifugé contient des retardateurs de flamme phosphorés tolérés par la directive RoHS (Restriction

Introduction

de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques) admis comme peu impactant sur l'environnement, à l'inverse des composés halogénés. Enfin, le recyclage de ce matériau très technique a été encore peu étudié. Ces particularités apportent de grandes opportunités de remise sur le marché de l'ABS recyclé en tant que matière première secondaire.

Afin de minimiser les impacts environnementaux de l'ABS de seconde génération, nous envisagerons exclusivement son recyclage mécanique. Cette méthode est en général préférable à d'autres procédés en termes d'optimisation de la consommation énergétique et de minimisation d'émissions de gaz à effet de serre.

Le mélange PC/ABS est considéré comme l'un des plus importants mélanges de polymères d'ingénierie commerciaux, car il combine les avantages souhaitables du PC et de l'ABS. Ces avantages incluent la bonne stabilité thermique et la résistance aux chocs du PC, la facilité de transformation, l'économie et les bonnes propriétés mécaniques de l'ABS [2,3,4,5]. En conséquence, le mélange PC/ABS a remplacé le PC au cours des dernières décennies, en devenant le plus grand vendu et le mélange de polymères le plus utilisé. Il est utilisé dans l'industrie automobile, d'électroménagers et dans l'informatique [6,4].

Le mélange PC/ABS sans agent compatibilisant, conduit à une séparation de phase, du fait de leurs faibles forces interfaciale et grande énergie de cohésion par rapport à l'énergie de dispersion. Par conséquent, un agent compatibilisant doit être ajouté pour réduire la taille et améliorer les propriétés mécaniques. Si un bon agent compatibilisant est utilisé, des résultats intéressants seront obtenus et, par conséquent, de nouvelles applications vont être développées [7].

L'objectif de notre mémoire de fin de cycle est d'améliorer la compatibilité des mélanges à base de PC et d'ABS, en utilisant un faible taux en agent compatibilisant, il s'agit du copolymère styrène éthylène butylène styrène greffé par l'anhydride maléique (SEBS-g-MAH). Pour cela des mélanges de PC et d'ABS ont été préparés sans et avec l'agent compatibilisant par extrusion à des taux de 1, 3 et 5%, ensuite, les mélanges élaborés ont été caractérisés par des essais mécaniques (traction, choc), l'analyse calorimétrique différentielle (DSC), l'analyse mécanique dynamique (AMD), la rhéologie dynamique et la microscopie électronique à balayage (MEB), et l'analyse thermogravimétrique (ATG). Ce travail a été réalisé théoriquement en adoptant, pour la partie expérimentale initialement définie dans notre plan d'action, un travail existant dans la littérature.

Le plan de travail élaboré pour atteindre cet objectif est décomposé en cinq chapitres

Le premier chapitre : Présente des généralités sur les plastiques.

Introduction

Le deuxième chapitre : Est consacré à une étude sur les déchets d'équipement électrique et électronique.

Le troisième chapitre : Est consacré à une étude sur la revalorisation des déchets plastiques styréniques.

Le quatrième chapitre : Présent une étude bibliographique récente des études des mélanges PC/ABS.

Le cinquième chapitre : Présente tous les résultats de la caractérisation du mélange ainsi que leur discussion.

Enfin, une conclusion générale qui permet de résumer les résultats trouvés.

Introduction

Références bibliographiques

- [1] Ausset S. (2013). "Procédé de recyclage de mélanges (PC/ABS) issus de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)". Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, Français, pp 1-3.
- [2] Moinijazani A., Arefazar S H., Jafari M H et al. (2011). " A study on the effects of SEBS-g-MAH on the phase morphology and mechanical properties of polypropylene/polycarbonate/SEBS ternary polymer blends". Journal of Applied Polymer Science., 121, pp 2680-2687.
- [3] González J I and Nazabal J. (2006). " Rubber toughened polyamide 6/clay nanocomposites ". Composite, Science Technologie., 66, pp 1833-1843.
- [4] Farzadfar A and NouriKhorasani S. (2012)."Effect of EVA-g-MAH on mechanical properties of PC/ ABS blends", Polymer Plastic Technologie Ingenieur. 51, pp 1424-1426
- [5] Balakrishnan S and Neelakantan N R. (1998). "Mechanical properties of blends of polycarbonate with unmodified and maleic anhydride grafted ABS ". Polymer Internationnal.,45, pp 347-352.
- [6] Jin D., Shon K H., Jeong H et al. (1998). "Compatibility Enhancement of ABS/Polycarbonate Blends", Journal Applied of Polymer. Science. 69, pp 533-542.
- [7] Kim B S., Shin J L., Hong WJ et al. (2001). " Reactive compatibilization of the PBT/EVA blend by maleic anhydride ", Polymer., 42, pp 4073-4080.

I.1.2. Les familles des matières plastiques

Les matières plastiques peuvent être classés généralement selon trois familles principales tel que :

➤ Les thermodurcissables

Au premier refroidissement les thermodurcissables prennent une forme définitive et deviennent durs et ne se ramollissent plus une fois moulés. Leur technique de fabrication est difficile à mettre en œuvre, mais les matériaux produits sont très solides et très résistants à la chaleur et aux agressions chimiques [5].



Figure I.2. : Exemples d'un produit fait de matière thermodurcissable [6].

➤ Les thermoplastiques

Sous l'effet de la chaleur, les thermoplastiques ramollissent et deviennent souples. On peut alors leur donner une forme qu'ils garderont après refroidissant. Leur transformation est réversible et renouvelable un grand nombre de fois. Les thermoplastiques sont ainsi facilement recyclables, cependant ils ne sont pas biodégradables et ont une durée de vie de plusieurs centaines d'années [5].



Figure I.3. : Exemples de produits faits de matières thermoplastiques [6].

➤ Les élastomères

Les élastomères sont issus du latex ou caoutchouc et sont élastiques, ils se déforment et tendent à reprendre leur forme initiale et supportent de très grandes déformations avant rupture. Les élastomères présentent des caractéristiques bien spécifiques : grande élasticité, bonne étanchéité, fort pouvoir amortissant etc. Ils sont employés essentiellement en tant que pneumatiques, on les utilise également sous la forme de joints, tubes et tuyaux, de membranes, dans de nombreux domaines d'activités comme en automobile, en médecine et en aéronautique [5].



Figure I.4. : Pneumatique produits à partir d'élastomères [6].

I.1.3. Les différentes catégories des plastiques

I.1.3.1. Les plastiques techniques : les plastiques techniques sont une catégorie de plastiques, principalement utilisés pour des applications à haute performance telles que la résistance à la chaleur, la résistance chimique, la résistance aux chocs, l'ignifugation ou la résistance mécanique. Les plastiques techniques sont plus efficaces que les plastiques de base et sont idéaux pour les applications qui nécessitent une ingénierie pour concevoir des composants utilisés pour leur utilisation prévue [7].

I.1.3.2. Les plastiques d'usages courants : contrairement aux plastiques techniques, les plastiques d'usages courants sont relativement bon marché et ont des propriétés mécaniques plus faibles. Ces matériaux sont produits sous forme de plastiques à grand volume pour des applications telles que l'emballage et les articles ménagers généraux, dans lesquels des caractéristiques matérielles supérieures ne sont pas requises [8].

I.1.3.3. Les plastique à haute performance : outre les plastiques d'usages courants et les plastiques techniques, il existe également des plastiques hautes performances qui diffèrent des

plastiques standard et des plastiques techniques principalement par leur stabilité à la température, leur résistance chimique et leurs propriétés mécaniques. Ce sont des plastiques qui répondent à des exigences plus élevées que les plastiques standards ou techniques. Ils sont plus chers et généralement utilisés en moindre quantité [9].

I.1.4. Propriétés des matières plastiques :

Les propriétés des matières plastiques dépendent de la nature chimique du motif, du degré de polymérisation ou de polycondensation et aussi de l'adjuvant [10].

Les différentes propriétés des matières plastiques sont :

➤ **Propriétés physiques :**

◆ **Masse volumique** : elle varie, en générale, de 1 à 1.7 kg/cm³ mais augmente progressivement suivant le degré de polymérisation ou de condensation.

◆ **Couleur** : suivant la quantité de l'adjuvant ajoutée à la matière.

➤ **Propriétés chimiques** : sont très variables par rapport aux différents produits chimiques.

➤ **Propriétés mécaniques** : Principalement la résistance à la traction, à la compression, et à la flexion, l'allongement à la rupture on peut ajouter à la liste la plasticité et l'élasticité.

➤ **Propriétés électriques** : bons isolants électriques avec des propriétés statiques dépendant des solutions antistatiques éventuelles.

➤ **Propriétés thermiques** : bons isolants thermiques en général.

◆ **Solubilité** : selon leur nature, la matière plastique peut être soluble dans certains solvants, cette solubilité décroît quand le degré de polymérisation ou de polycondensation augmente.

I.1.5. Domaine d'application des matières plastiques

Les matières plastiques sont désormais présentes dans tous les grands secteurs industriels, comme elles couvrent presque tous les domaines d'application [11].

L'industrie de la construction et de l'automobile, l'industrie alimentaire et le monde médical sont parmi les plus grands consommateurs des nouveaux matériaux plastiques.

- **Secteur automobile et le transport** : les moyens de transports comme les voitures, trains, les camions, les avions utilisés pour le transport de l'eau minérale, les emballages plastiques (bouteilles, films de palettisation, palettes), etc.
- **Secteur d'emballage plastique** : sous forme d'emballage alimentaire, les bouteilles PET, les sachets pour emballer dans l'industrie ou la cuisine, les calages qui se mettent à l'intérieur des cartons d'emballage, le flaconnage pour tous les produits de soins de beauté ou autres domaine médical. A titre d'exemples, on utilise le PP pour fabriquer les seringues médicales, et le PE et le PVC pour produire des tubes, des tuyaux, des emballages stériles variés.
- **Les applications paramédicales** : allant des lunettes aux brosses à dents...
- **Domaine électriques et électroniques** : les câbles, des ordinateurs, des téléphones fixes et portables, les réfrigérateurs, sont tous fabriqués en plastiques telles que le PVC.
- **L'agriculture** : Les usages les plus habituels du plastique dans le domaine de l'agriculture sont : des serres, des tuyaux pour les canalisations d'eau, des tunnels de culture, etc.
- **Domaine la construction et les travaux publics** : les plastiques sont utilisés pour fabriquer les tuyaux et gaines, sous terre ou dans les murs, les huisseries et la menuiserie (PVC), l'isolation thermique ou phonique, des portes, des coques ou des éléments de structure.

La Figure I.5. Représente quelques exemples d'applications des matières plastiques.

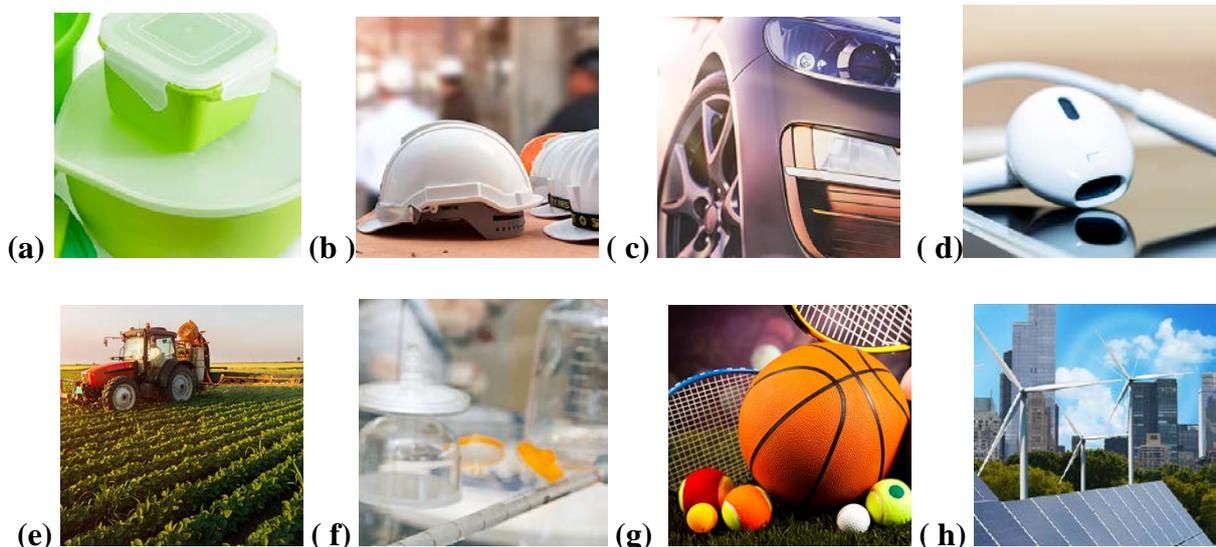


Figure I.5. : Exemples d'applications des matières plastiques, (a) : emballage, (b) : construction, (c) : mobilité et transport, (d) : électronique, (e) : agriculture, (f) : Soins et santé, (g) : sport et loisirs, (h) : énergie [11].

I.2. Les déchets plastiques

Durant les quarante dernières années, on a assisté à une augmentation du niveau de vie et à une modification des modes de consommation qui ont généré une augmentation importante des déchets plastiques. En même temps, les matériaux à base de polymères ont été de plus en plus largement utilisés dans tous les domaines. En effet en Europe les déchets plastiques ne représentent pas moins de 12,5 millions de tonnes par an et seuls quelques 7% de cette quantité sont destinés à une filière de recyclage [11].

I.2.1. Définition

Les déchets plastiques proviennent des résidus de processus de production, de transformation et de consommation des matériaux plastiques [12].

I.2.2. Classification des déchets plastique

Il existe donc plusieurs types de déchets plastiques tels que [12] :

I.2.2.1. Les déchets plastiques industriels

Ces déchets sont constitués de tous les déchets issus des procédés de production de résines (trouvés principalement sur les sites pétrochimiques) et de transformation des résines en produits finis. Les déchets de production proviennent des arrêts des réacteurs de polymérisation, de la désinfection des réacteurs et des lots déclassés [12]. Ils ont la particularité d'un faible degré de pollution, voire inexistant. On retrouve, en très grande majorité, les polymères de grande diffusion (PE, PP, PS et PVC). Quant aux déchets de transformation, ils proviennent de toutes les opérations de plasturgie, qui permettent la production de produits finis (extrusion, injection, soufflage, polissage, etc.).

I.2.2.2. Les déchets plastiques de post-consommation

C'est l'ensemble des déchets issus de la consommation industrielle ou des particuliers.

On distingue :

I.2.2.2.1 Les déchets ménagers : comme les récipients alimentaires, bouteilles de boissons gazeuses, sacs d'emballage [13].

I.2.2.2.2. Les déchets agricoles : tels que les films, sacs d'alimentation, fûts et bidons de produits phytosanitaires, etc. [13].

I.2.2.2.3. Les déchets électriques et électroniques : comme les appareils électroménagers, ordinateurs, câbles en tout genre, les réfrigérateurs, etc. [13].

I.2.2.2.4. Les déchets du bâtiment et des travaux publics : tels que les revêtements de sols, fils, câbles, mousses d'isolation, tuyaux, etc. [14].

I.2.2.2.5. Les déchets commerciaux ou de distributions : comme les emballages industriels et commerciaux, les fûts, bidons, sacs, etc. [12].

I.3. La pollution plastique

La pollution plastique est considérée comme un problème environnemental majeur engendrée par l'accumulation de déchets plastiques, il est corrélé au faible coût du plastique qui entraîne une utilisation massive de ce dernier [15]. Cette pollution peut avoir des effets nuisibles sur la terre, les mers et les océans, ainsi que dans les cours d'eau en affectant la vie sauvage, l'habitat et secondairement ou par rétroaction des êtres humains.

I.3.1. Typologie de pollutions par le plastique

La pollution plastique est constituée :

- D'amoncèlements de macro-déchets, avec notamment une accumulation de déchets en mer (portés par le vent, la pluie et les cours d'eau), la pollution de l'eau par les déchets et fragments ou microparticules de plastiques.
- Des microplastiques issus de la dégradation d'éléments plus gros sous l'effet des éléments (eau, soleil, usure, etc.) remontant la chaîne alimentaire.
- De l'arrivée dans les cours d'eau puis en mer de microbilles de plastiques issues de produits cosmétiques et de produits de soins du corps en contenant (plus de six cents produits différents rien qu'aux États-Unis) [16].



Figure I.6. : Pollution plastique sur des plantes [16].

I.3.2. Impact des déchets plastiques sur l'environnement et la santé public**I.3.2.1. Impact des déchets plastique sur la santé publique :**

La gestion des déchets, en partant de la collecte, en passant par le transport pour enfin arriver aux filières de traitement ; pose un problème d'exposition pour les populations (travailleurs, riverains, usagers). En effet, l'homme peut être exposé à des nuisances et/ou à des substances dangereuses émises par les installations de traitement des déchets. Les voies d'exposition sont multiples : les voies directes et les voies indirectes [17].

I.3.2.2. Impact des déchets plastique sur l'environnement**➤ Impact sur l'eau**

La plupart des décharges se trouvent à l'air libre, ce qui n'est pas bien et en même temps très dangereux, quand il pleut les déchets biodégradables se mélangent avec l'eau et cette réaction produit un carbone organique qui peut provoquer les pluies acides.

Par suite ces pluies acides polluent les différentes sources d'eau comme les rivières, fleuves et océans. De plus, suite aux pluies, l'eau passe à travers des déchets, descend dans le sol, pendant des jours elle continue jusqu'à ce qu'elle atteigne les nappes phréatiques. En conséquence les nappes phréatiques sont contaminées avec des polluants divers comme les métaux lourds, les produits de nettoyage et les déchets toxiques [18].

➤ Impact sur les sols

Les décharges constituent une cause considérable de pollution des sols par divers métaux lourds et d'innombrables composés organiques de toxicité redoutable, cette pollution conduit à des altérations physico-chimiques des végétaux et des animaux qui transforment la structure des communautés vivantes et cause ainsi la perturbation de l'équilibre chimique des sols et l'appauvrissement en minéraux [19].

➤ Impact sur l'air

- ◆ Les biogaz des décharges sont à l'origine d'importantes nuisances qui sont parfois très graves pour la santé et pour l'environnement.
- ◆ Les méthodes de broyages ou d'incinération des déchets libèrent aussi des particules qui diffusent dans l'air et dégrade sa qualité.

- ◆ L'incinération des déchets en plein air dégage des gaz (CO₂) qui représentent des risques d'asphyxie.
- ◆ Les composés organiques volatiles toxiques au niveau des biogaz peuvent entraîner des cancers.

I.3.3. Lutte contre la pollution par les plastiques

Diverses initiatives ont été prises pour réduire cette pollution en amont, par un meilleur tri et une meilleure récupération des déchets, et parfois par une réduction de la consommation du plastique accompagnant la promotion du recyclage du plastique [20].

Pourtant, les bénéfices économiques et environnementaux sont considérables. Le recyclage protège les ressources, réduit les déchets et crée environ six emplois pour chaque emploi qui serait créé par l'enfouissement de la même quantité de déchets [21]. Le recyclage peut évidemment être une méthode séduisante et rationnelle puisqu'elle évite un continuel gaspillage des ressources naturelles et d'énergie, de sécuriser l'approvisionnement de l'industrie en matières premières, de diminuer ses impacts environnementaux.

Pour promouvoir le recyclage des déchets en matières plastiques et leur incorporation dans des produits, nous nous concentrons sur le cas d'EEE, sans toutefois écarter la prise en compte d'autres filières, notamment celles qui produisent ou utilisent les résines plastiques présentes dans les DEEE (styréniques et polyoléfinés notamment).

Références bibliographiques

- [1] Baha H and Ait hammouda S. (2019). "Suivi des opérations de tri et valorisation des déchets solides (cas des déchets plastiques)". Mémoire master, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, pp 1-18.
- [2] Lefaux R and Derache R. (1986). " Les problèmes des matériaux en contact avec l'aliment". In Toxicologie et sécurité des aliments, Tec et Doc. Lavoisier, Paris, pp 125-126.
- [3] Bachiri S and Ferhane Z. (2012). "Etude et réalisation d'un broyeur pour les bouteilles en plastiques. Projet de fin de cycle, Université Abderrahmane Mira-Béjaia, page3.
- [4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Mati_plastique.
- [5] Atmani A. (2017). "Comportement mécanique en traction monotone d'un polymère associé au carbonate de calcium". Mémoire du master, Université badji Mokhtar Annaba, pp 6-8.
- [6] Fitih Y., Nicole H., Aaron K. (2021). " Plastiques Techniques : Analyse de Marché et Méthodes de Recyclage". Science open Preprints.
- [7] Europe P. (2015). "Plastics the Facts an analysis of European plastics production, demand and waste data". Wemmel –Belgium : Plastics Europe.
- [8] Kemmish J. (2011). "Practical Guide to High Performance Engineering Plastics. Shawbury, Shropshire, ismithers".
- [9] Tafitason M. (2017). "Contribution à la valorisation des déchets emballages films plastique de la société essai de fabrication de pave en plastique ". Mémoire de Master, Université d'Antananarivo, Madagascar, page 40.
- [10] Bachiri S and Ferhane Z. (2012). "Étude et réalisation d'un broyeur pour les bouteilles en plastiques ". Projet de fin de cycle, Université Abderrahmane Mira- Bejaia, pp 4- 5.
- [11] Panda A., Singh R., Mishra D. (2010). "Thermolys is of waste plastics to liquid fuel a suitable methods for plastic waste management and manufacture of value Added products a world prospective ". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), PP 233–248.
- [12] Bemmami K., Tchouar A. (2017). "Conception et réalisation d'une unité de recyclage-plastique". Projet de fin d'étude, Université Abou Bekr Belkaid –Tlemcen, page23

- [13] Djeflal H and Chaouche Y. (2017). "Le recyclage des déchets plastiques dans le cadre du développement durable : cas des entreprises de recyclage de la wilaya de Tizi-Ouzou ". Mémoire de Master en Science Économiques, Université Mouloud, page23.
- [14] Eriksen M., Lebreton M., Carson H et al. (2014). " Plastic Pollution in the World's Oceans : More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea". Plos ONE, 9(12), PP 111-913.
- [15] Becker C., Bergfeld W., Belsito V et al. (2014). "Safety Assessment of Modified Terephthalate Polymers as Used in Cosmetics ". International Journal of Toxicology, 33(3), PP 36-47.
- [16] Turlan T. (2013). "Les déchets : collecte, traitement, tri, recyclage ". Paris : L'Usine nouvelle, page 215.
- [17] Ausra S and Juan G. (2012). "Impact de la production des déchets sur environnement", URL (<http://owl-ge.ch/travaux-d-eleves>).
- [18] Ramade F. (1992). "Précis et d'éco-toxicologie, Ed Masson", page 300.
- [19] Bonnie M. (2009). "Australiantownbansbottledwater, the Daily Telegraph".
- [20] Raul J. (2002). " Les polymères solides, amorphes, élastomères, semi cristallins ". Cépaduès édition Toulouse.

Chapitre II Déchets des équipements électriques et électroniques

Chapitre II : Déchets des équipements électriques et électroniques (DEEE)

Introduction

Dans les nombreux débats des dernières années portant sur l'impact environnemental et la gestion des déchets, les DEEE ont occupé une place importante [1]. Cela s'explique d'une part par la quantité croissante et la grande diversité d'EEE utilisées par la société moderne. Les évolutions rapides de la société ces 30 dernières années dans les modes de vie, de travail, de communication ont en effet fortement augmenté les EEE, qui, du fait d'une innovation sans cesse plus grande et d'une évolution rapide des technologies, deviennent très vite obsolètes. La gestion des DEEE est devenue un enjeu logistique, environnemental et sociétal majeur. Progressivement, les DEEE ont été reconnus comme une source de déchet distincte et importante parmi les nombreux déchets solides.

II.1. Définition DEEE

Un DEEE est un Déchet d'Équipement Électrique et Électronique, c'est-à-dire un équipement ou une partie d'EEE arrivé en fin de vie ou ayant perdu son usage initial. Les appareils fonctionnant grâce à un courant électrique ou à un champ électromagnétique, ou encore les appareils de mesure de ces courants et champs, conçus pour être utilisés à une tension de dépassant pas 1000 volts en courant alternatif et 1500 volts en courant continu. Ces déchets issus de produits nécessaires à notre vie professionnelle ou personnelle sont en augmentation constante depuis plusieurs décennies [2].

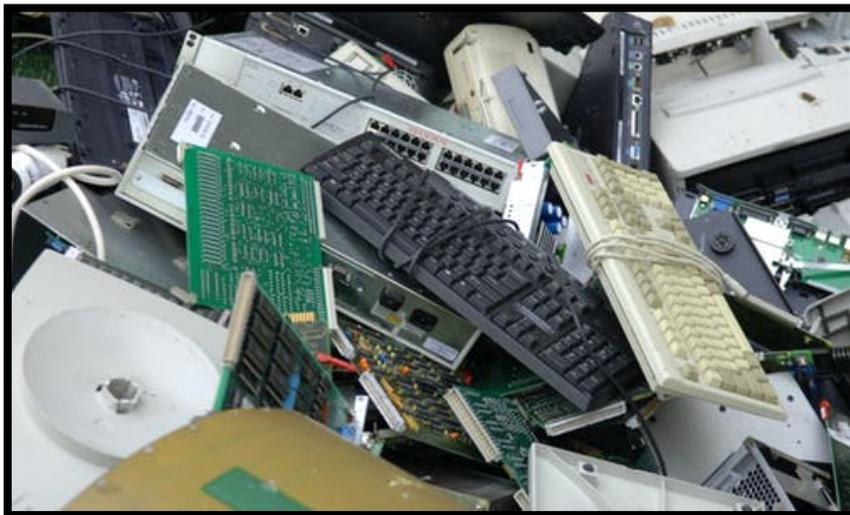


Figure II .1. : Déchets d'équipement électrique et électronique [2].

II.2. Les catégories des DEEE

Les DEEE sont classés en 10 catégories [3] :

- Catégorie 1 : Gros appareils ménagers.
- Catégorie 2 : Petits appareils ménagers.
- Catégorie 3 : Équipements informatiques et de télécommunications.
- Catégorie 4 : Matériel grand public.
- Catégorie 5 : Matériel d'éclairage.
- Catégorie 6 : Outils électriques et électroniques (à l'exception des gros outils industriels fixes).
- Catégorie 7 : Jouets, équipements de loisir et de sport.
- Catégorie 8 : Dispositifs médicaux (à l'exception de tous les produits implantés ou infectés).
- Catégorie 9 : Instruments de surveillance et de contrôle.
- Catégorie 10 : Distributeurs automatiques.

II.3. Composition des DEEE

Afin de maîtriser et d'ajuster aux mieux nos méthodes d'analyse, il est primordial de connaître les différents types de matériaux rencontrés dans les DEEE. Les DEEE sont très hétérogènes et complexes en termes de type, taille et forme des composants et matériaux [4].

Des campagnes de caractérisation sont menées par les éco-organismes pour connaître la composition des déchets traités. La Figure II.2 montre que les métaux constituent la plus grande partie (50 % en masse) des matériaux présents dans les DEEE, suivis des polymères et du verre.

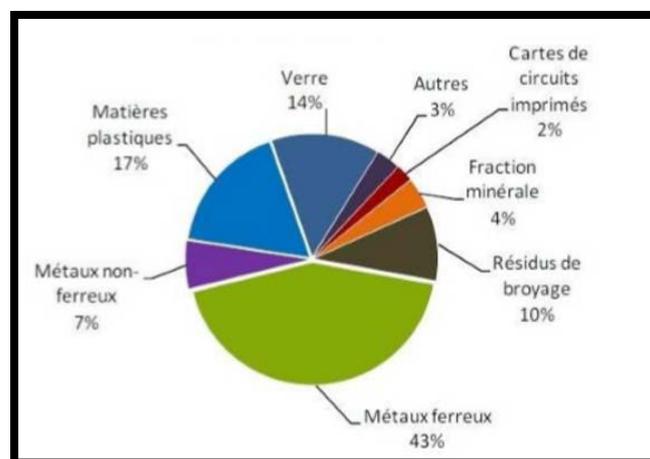


Figure II.2. : Composition (en masse) des DEEE traités (446 083 tonnes traitées) [5].

Chapitre II Déchets des équipements électriques et électroniques

II.4. L'impact des DEEE

Les conséquences environnementales de la production des biens électriques et électroniques dépassent de loin celles de la fabrication d'autres produits. Depuis le début des années 90, le problème lié aux déchets électroniques est en point de mire des milieux spécialisés. De plus, la quantité de déchets électroniques produite augmente en raison du nombre croissant d'appareils utilisés dans les ménages, les bureaux et plus généralement dans le monde moderne.

Lors de sa vie utile, un équipement informatique ne pose généralement pas de problème d'émission de substances toxiques. En tant que déchet électronique par contre, ces équipements sont potentiellement en mesure d'émettre de nombreux éléments toxiques si la gestion de la fin de vie de ces équipements n'est pas assurée adéquatement et ne respecte pas l'environnement. Tout cela a des conséquences néfastes sur l'environnement, car environ 70 % des matières premières des déchets spécifiques sont contaminées et ne sont pas toujours correctement traitées. En outre, dans de nombreux pays, la population n'a pas conscience des problèmes engendrés par les déchets informatiques et cela augmente le problème. Les appareils électriques et électroniques sont des produits complexes, fabriqués à partir de nombreuses matières ayant des effets sur l'environnement et l'élimination et le recyclage de ce genre de déchets constitue un problème à cause de ces matières polluantes comme le plomb, le cadmium ou le biphénylène surchloré [5].

II.5. Pourquoi gérer les DEEE

Les DEEE contiennent des matériaux polluants et des matériaux valorisables. La collecte et le traitement des DEEE en filière REP permet d'une part de limiter le gaspillage des ressources naturelles nécessaires à leur conception et d'autre part, d'éviter la dissémination de certains polluants.

- Les polluants : les gaz CFC, le plomb, le mercure...
- Les matériaux valorisables : Les métaux ferreux et non-ferreux, les plastiques, le verre, les terres rares...

Se préoccuper de ses DEEE, c'est donc une obligation réglementaire qui permet de réduire sensiblement son empreinte environnementale [2].

II.6. Répartition des DEEE par type de polymères

Les types de polymères issus des DEEE sont représentés dans la figure II.3.

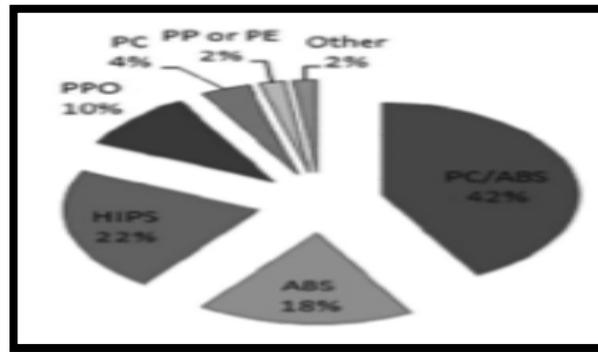


Figure II.3. : Répartition des DEEE par types de polymères [6].

Les polymères ou mélanges de polymères composent ces DEEE, dont l'ABS, le HIPS, le PP, le PS, le SAN, le PU, le PA, les mélanges PC/ABS et HIPS/PPO. Les deux polymères majoritaires sont le HIPS et ABS, utilisés pour leur propriété de résistance aux chocs [6].

II.7. Stratégies de traitement des DEEE

II.7.1. Cycle de vie d'un produit

Le cycle de vie d'un produit fait référence à la séquence d'étapes interdépendantes d'un produit depuis l'acquisition des matières premières pour la fabrication jusqu'à sa fin de vie [7].

II.7.2. Réparation

La réparation est tout simplement la correction des défauts spécifiés, c'est l'approche la plus logique pour fermer la boucle de l'utilisation du produit ; c'est tout simplement le réparer pour prolonger son cycle de vie. Bien que cela soit un concept simple, sa pratique est faible et peu de recherches ont été entreprises pour comprendre cette option en boucle fermée. En règle générale, la qualité des produits réparés est inférieure à celles des produits remanufacturés et reconditionnés. Lorsque les produits réparés ont des garanties, elles sont inférieures à celles des produits nouvellement fabriqués. En outre, la garantie ne couvre pas l'ensemble du produit, mais uniquement le composant remplacé [8].

II.7.3. Révision

Le reconditionnement ou la révision, implique moins de travail que le réusinage, mais plus que la réparation. En effet, la remise en état nécessite généralement la reconstruction des composantes principales pour un fonctionnement généralement prévu pour être inférieur à celui du modèle

Chapitre II Déchets des équipements électriques et électroniques

original. Cette pratique a créé ce qu'on appelle un marché de « produits gris » où les "produits blancs" originaux tels que les réfrigérateurs et les machines à laver sont reconditionnés après une seule vie et retournés à la vente en tant que « produits gris » [8].

II.7.4. Réusinage (rénovation, reconstitution)

Le réusinage est le seul processus où les produits utilisés sont amenés aux fabricants de l'équipement d'origine du point de vue du client et au même temps, les garanties qui sont données sont égales à celles des nouveaux produits équivalents. La caractéristique essentielle d'un point de vue environnemental est que le réusinage préserve l'énergie intrinsèque qui a été utilisée pour fabriquer les premiers composants. La réutilisation de la matière, permet d'économiser l'énergie nécessaire pour produire un nouveau produit. Bien que les avantages environnementaux soient clairs, il y a d'autres avantages de réusinage [8].

La Figure II.4 montre un modèle d'une boucle fermée formée par la réparation, la remise à neuf et le recyclage :

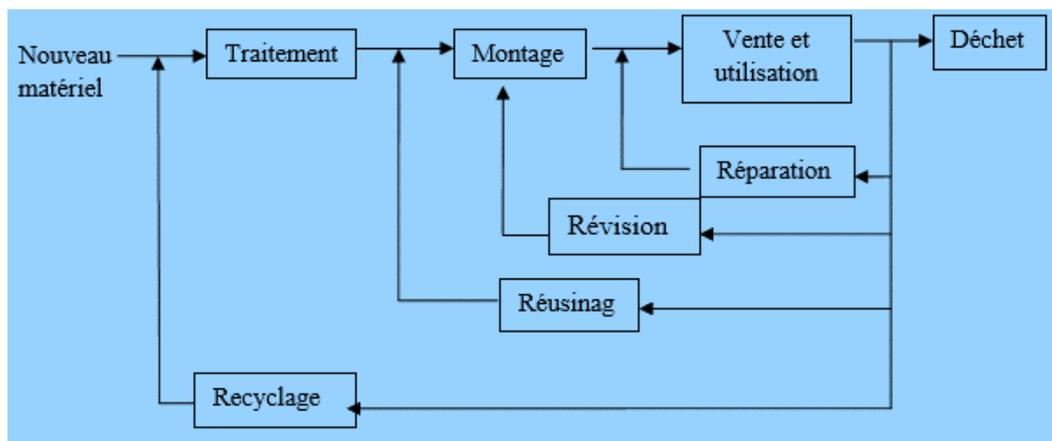


Figure II.4. : Conception d'une boucle fermée par la réparation, la remise à neuf et le recyclage [8].

II.7.5. Recyclage des DEEE

Le recyclage des DEEE est une étape importante dans les stratégies de traitement des DEEE en fin de vie. La maximisation de la valorisation des matériaux précieux et la minimisation conséquente de l'élimination reposent sur les technologies utilisées dans le processus.

Les producteurs sont invités à financer la collecte, le traitement, la récupération et l'élimination écologiquement rationnelle de ces déchets. Elle impose un taux de recyclage élevé pour tous les produits visés. Ce taux varie de 50% à plus de 80% selon le type de déchet. La stratégie comprend : la collecte, le tri, la remise à neuf, le démontage, le broyage, le traitement des composants/matériaux recyclables, le traitement des composants/substances dangereux, et la mise

Chapitre II Déchets des équipements électriques et électroniques

en décharge ou l'incinération (avec récupération de chaleur) des déchets non recyclables et non valorisables.

Les consommateurs sont tenus de coopérer dans le transfert des appareils utilisés aux détaillants ou aux municipalités, et de payer les frais nécessaires pour la collecte, le transport, et le recyclage. Dans les entreprises de recyclage, les DEEE sont triés, traités, démontés et écrasés. Les matériaux précieux, tels que le verre, l'aluminium, certains types de matières plastiques, le cuivre et le fer sont récupérés par centrifuge électromagnétique, et les techniques de séparation par gravité, tandis que les substances dangereuses sont récupérées et détruites par des procédés thermiques ou chimiques [9].

Le recyclage mécanique des DEEE peut être largement divisé en trois grandes étapes :

- **Démontage (démantèlement)** : qui nécessite le ciblage pour distinguer les composants dangereux de ceux qui sont précieux.
- **Mise à niveau** : qui se fait grâce à un traitement mécanique/physique pour mettre à niveau la teneur en matières souhaitables, à savoir la préparation de matériaux pour les processus de raffinage.
- **Raffinage** : dans la dernière étape, les matériaux récupérés reviennent à leur cycle de vie.

Etat de l'art de récupération des DEEE

Dans cette section, un bref aperçu des différentes études qui se sont intéressées sur les déchets d'équipement électronique et électrique.

Tarantili P et al. [10] ont étudié les caractéristiques des plastiques techniques utilisés dans la préparation d'EEE. Plus précisément, leur réponse thermique a été enregistrée par des expériences DSC, les propriétés rhéologiques ont été étudiées via des tests IFC et les propriétés mécaniques ont été évaluées avec des essais de traction. L'objectif était d'établir une procédure de recyclage les mêmes plastiques techniques dérivés des DEEE, ce qui offre l'avantage supplémentaire d'utiliser le flux de déchets tel que reçu sous forme de mélange recyclable, c'est-à-dire sans tri et classification de ses composants. Les résultats expérimentaux ont montré que des mélanges de PC avec ABS ou ABS/HIPS peuvent être préparés par mélange ce qui permettrait une manipulation aisée des plastiques techniques issus de DEEE, c'est-à-dire le mélange sans avoir besoin de trier. Ces mélanges peuvent être facilement traités et afficher une mécanique acceptable propriétés à un coût raisonnable. Par conséquent, les caractéristiques de traitement et les propriétés des systèmes étudiés dans ce travail pourrait être la clé pour la conception d'une approche intéressante pour la manipulation des déchets plastiques solides d'appareils électriques et électroniques.

Chapitre II Déchets des équipements électriques et électroniques

Makenji K et al. [11] a traité les techniques utilisées pour le recyclage des DEEE. Les ordinateurs personnels, les téléviseurs, les équipements de cuisine et audio sont parmi les articles les plus populaires à recycler, produisant des polymères précieux comme l'ABS, le PC et différentes variétés de polystyrène. Le processus de recyclage mécanique consiste à collecter, trier, dimensionner, réduire, séparer et densifier ces déchets de manière économique et efficace. L'efficacité des techniques de séparation telles que la flottation, l'hydrocyclone, l'air le dépotage, le tri proche infrarouge et électrostatique sont examinés. Les variations dans la collecte et le traitement efficaces des DEEE parmi les membres des états de l'Union Européenne sont également discutés. Les travaux futurs avec les plastiques DEEE sont basés sur utilisation acceptable de polymères non miscibles par transformation ou chimie modification. Un autre domaine de recherche est de fabriquer les polymères plus facile à séparer et la recherche semble être en cours pour minimiser l'utilisation de différents types de polymères dans un produit, ce qui rend le processus de recyclage plus simple.

Goosey M [12] s'est concentrée sur les la composition des matériaux rencontrés dans les DEEE. Il a discuté l'historique, et le contexte actuel et le futur des DEEE, en tenant compte de l'impact des nouvelles technologies sur la composition des matériaux. La composition des matériaux des DEEE est également revue du point de vue de la technologie de recyclage et de récupération disponibles utilisées par les recycleurs. Le récent le changement dans la technologie utilisée pour les écrans de télévision et d'ordinateurs est mis en évidence comme un exemple spécifique de l'évolution des besoins en matériaux et de la façon dont ils ont un impact sur la récupération et la réutilisation. La perte potentielle de matériaux précieux et des éléments dans le contexte de la liste croissante des éléments menacés et la nécessité d'assurer un approvisionnement stratégique de ces matériaux est également présentée. Les exemples de nouvelles approches de récupération de matériaux utilisant des liquides ioniques et l'intelligence embarquée sont utilisées pour souligner l'importance des nouvelles technologies pour améliorer les taux de récupération des matériaux des DEEE. Une section qui traite de certains des nouveaux matériaux commencent à trouver une utilisation dans des applications électriques et électroniques et qui auront un impact sur la composition des DEEE à l'avenir, par ex. nanomatériaux et électronique organique/imprimée.

Vazquez Y et al. [13] se sont intéressée aux déchets plastiques provenant des DEEE qui ont augmenté de façon exponentielle au cours des deux dernières décennies. L'augmentation est due soit à la consommation de produits technologiques, comme les téléphones portables ou les ordinateurs, soit à la courte durée de vie de ces produits, contribue à cette élévation générant une accumulation de matière plastique spécifique tels que l'ABS, le HIPS, le PC, entre autres. Tous

Chapitre II Déchets des équipements électriques et électroniques

peuvent être recyclés par eux-mêmes. Cependant, les séparer par type n'est ni facile ni économiquement viable, alors une alternative consiste à les recycler ensemble sous forme de mélange. Prenant en compte qu'il pourrait être une détérioration des propriétés finales, pour améliorer l'adhérence de phase et ajouter de la valeur à un nouveau mélange de plastique DEEE, une compatibilité est nécessaire. Dans cette étude, une étude systématique de différents compatibilisants pour les mélanges de HIPS et d'ABS de DEEE ont été réalisés. Une analyse de dépistage a été réalisée en ajoutant deux concentrations de compatibilisant différentes (2% en poids et 20% en poids) sur un HIPS/ABS physique mélange 80/20 à partir de déchets électroniques en plastique. Trois copolymères ont été sélectionnés comme compatibilisants possibles par leur affinité possible avec les DEEE plastiques initiaux. Une caractérisation complète de chaque DEEE a été effectuée. L'efficacité de compatibilisation a été évaluée en comparant soit les propriétés mécaniques ou morphologiques des mélanges et leurs aspects. Compte tenu des mélanges analysés dans ce travail, la meilleure performance a été obtenue en utilisant 2% de caoutchouc styrène-acrylonitrile, obtenant un mélange compatible avec une double résistance ultime par rapport au mélange physique et améliorent également les propriétés mécaniques des plastiques DEEE initiaux. Le voie proposée est une voie prometteuse pour améliorer les avantages de la ferraille électronique avec des coûts durables, bas et faciles à manipuler. Par conséquent, l'intérêt social pour le recyclage sera encouragé.

Tostar S [14] a étudiée le développement rapide des DEEE. Les plastiques au sein des DEEE ont un rôle important dans la réalisation des objectifs de valorisation et de recyclage définis dans la directive européenne. Cette étude considère le recyclage des plastiques DEEE en un mélange des différents plastiques au lieu de les séparer. Les propriétés mécaniques et thermiques peuvent être améliorées en ajoutant un comptabilisant. Il a été constaté qu'un compatibilisateur, un copolymère de SEBS nommé Kraton ® G1652 E, avait un impact important sur la ductilité du mélange de plastiques DEEE recyclés. En ajoutant 2,5% en poids (% en poids) de ce copolymère, l'allongement à la rupture a augmenté de plus de cinq fois par rapport aux échantillons non compatibilisés, avec seulement une petite diminution de la rigidité et de la résistance. Le module de stockage a légèrement diminué avec l'augmentation des quantités de compatibilisant tandis que la résistance aux chocs a augmentée avec des quantités croissantes de compatibilisant, à partir de 2,1 kJ/m² (référence matériau) à 3,6 kJ/m² (Compatibilisant à 5% en poids (% en poids)). Il a été constaté que Kraton ® FG1901 E SEBS-g-MAH, Royaltuf ® 372P20 (SAN) modifié avec des élastomères EPDM et Fusabond® P353 PP-g-MAH étaient inefficaces comme agents de compatibilité avec le mélange. L'irradiation gamma (50 kg) n'a pas cependant amélioré la propriété : la résistance aux chocs des échantillons irradiés gamma était inférieure à celle de l'échantillon non irradié.

Références bibliographiques

- [1] Townsend T. (2011). " Environmental Issues and Management Strategies for Waste Electronic and Electrical Equipment". Journal of the Air & Waste Management Association,61(6), pp 587-610.
- [2] <http://www.e-dechet.com/deee/qu-est-ce-qu-un-dechets-d-equipements-electriques-et-electroniques-deee-ou-d3e.htm>.
- [3] Reygner B. (2018). « Eco3E, ». [Enligne], Available : <http://eco3e.eu/reglementations/deee2>.
- [4] Cui J and Forsberg E. (2003). " Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment : a review". Journal of Hazardous Materials, 99(3), pp 243-263.
- [5] Apia S. (2018). « Déchets électroniques dans le Pacifique : stratégie régionale et plan d'action ». "Progress in Polymer Science ". Secrétariat du Programme régional océanien de l'environnement, 23, pp 707–757.
- [6] Boubaker A. "Thèses Structuration des Mélanges ABS/PC en vue du Recyclage des DEEE".
- [7] Robinson H. (2009). "E-waste : An assessment of global production and environmental impacts". Science of the Total Environment, page 408.
- [8] Andrew M., Stuart B., Winnie I et al. (2004). " Reducing Waste : Repair, Recondition, Remanufacture or Recycle Sustainable Development ".
- [9] Wenzhi H ., Guangming L ., Xingfa M et al. (2006). "WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China". Journal of Hazardous Materials,36(3), pp 502-12.
- [10] Tarantili P. (2010). " Processing and properties of engineering plastics recycled from waste electrical and electronic equipment (WEEE)". Polymer Degradation and Stability, 95(3), pp 405–410.
- [11] Makenji K. (2012). " Mechanical methods of recycling plastics from WEEE". Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), Handbook, pp 212–238.
- [12] Goosey M. (2012). "The materials of WEEE. Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) "Handbook, pp 123–144.

Chapitre II **Déchets des équipements électriques et électroniques**

[13] Vazquez Y. (2016). " Recycling of mixed plastic waste from electrical and electronic equipment". Added value by compatibilization. Waste Management, 53, pp 196–203.

[14] Tostar S. (2016). " The Influence of Compatibilizer Addition and Gamma Irradiation on Mechanical and Rheological Properties of a Recycled WEEE Plastics Blend". Recycling, 1(1), pp 101–110.

Chapitre III : Revalorisation des déchets plastique styréniques issus des DEEE**Introduction**

Bien entendu, l'intérêt porté à la valorisation des matières plastiques peut être lié à la diminution des ressources mondiales en matières premières et à la législation concernant la protection de la nature et la préservation de la qualité de l'environnement. Certaines mesures réglementaires sont actuellement prises pour encourager le recyclage en vue de conserver les ressources naturelles pour les générations futures dans des perspectives de développement durable. Par conséquent, trouver des techniques non polluantes de recyclage de ces matériaux polymères est plus que nécessaire : elle est même vitale. Dans cette partie, on se propose de faire un résumé des enjeux concernant la valorisation des déchets de ce type, ainsi que les solutions rapportées pour sa réalisation pratique [1].

III.1. Les différentes méthodes de valorisation des déchets plastiques

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

III.1.1. Valorisation énergétique

Il s'agit du traitement des déchets plastiques par incinération (combustion totale), avec ou sans récupération d'énergie. Les déchets plastiques constituent un apport calorifique non négligeable qui peut être valorisé par récupération de la chaleur produite utilisable directement pour le chauffage ou sous forme d'énergie électrique. Pratiquement tous les plastiques peuvent être incinérés. Cependant, la dégradation de certains matériaux peut dégager des composés toxiques (acide chlorhydrique dans le cas du polychlorure de vinyle, acide nitrique pour le PA, acide sulfurique pour certains caoutchoucs, etc.) [1].

III.1.2. Recyclage chimique

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

- **La pyrolyse** : c'est la décomposition des molécules par chauffage sous vide. Ce procédé conduit à des hydrocarbures liquides ou gazeux utilisables ultérieurement dans les raffineries.

- **L'hydrogénation** : C'est le traitement par l'hydrogène et la chaleur des macromolécules qui sont craquées en huiles hydrocarbonées utilisables dans les raffineries et les usines de produits chimiques.
- **La gazéification** : les plastiques sont chauffés en présence d'air ou d'oxygène. Le gaz de synthèse résultant est constitué de monoxyde de carbone et d'hydrogène qui peut être utilisé dans la production de méthanol, d'ammoniac ou comme agent réducteur dans la production d'acier.
- **La décomposition chimique proprement dite** : On applique des procédés tels que l'hydrolyse, l'alcoololyse, etc. Les applications de cette voie de recyclage, attrayante dans son principe, sont jusqu'à présent limitées, à des polymères comme le PA, le PET et le PMMA, du fait de problèmes pratiques et de rentabilité. Ce principe de recyclage n'en est encore qu'à un stade pilote [1].

III.1.3. Recyclage mécanique

Le principe de ce type de valorisation des déchets est plus ou moins complexe et est envisagé depuis de nombreuses années. Il regroupe l'ensemble des méthodes de valorisation des déchets plastiques dans lesquelles les matériaux sont réutilisés tels quels ou après modification chimique. Le recyclage mécanique apparaît de loin comme la meilleure solution pour le traitement des déchets solides puisque toutes les méthodes citées auparavant sont de nature destructive. Un certain nombre d'opérations doit être prévu avant le recyclage mécanique : il s'agit de la collecte et du tri [1].

- **La collecte** : La collecte constitue une contrainte majeure, ce qui impose une organisation efficace afin de diminuer le coût de transport, qui une fois maîtrisé réduira considérablement le problème de la récupération. Les déchets en phase post-consommation sont généralement mélangés et pollués lorsqu'on les récupère dans le flux des déchets municipaux. C'est pour cette raison que des efforts ont été faits pour encourager les consommateurs à séparer les types de déchets en matières plastiques, au moins ceux qui sont faciles à identifier. Il peut s'agir par exemple de bouteilles ou de sacs de supermarché. Il existe plusieurs types de collecte :
 - ◆ **La collecte globale** : c'est une collecte multi-matériaux où la phase organique des ordures ménagères est mélangée avec l'ensemble des autres déchets.
 - ◆ **La collecte sélective** : elle a pour objectif de sélectionner, au départ des ménages, un ou plusieurs types de matériaux afin de faciliter leur valorisation ou leur élimination ultérieure.
 - ◆ **La collecte spécifique** : exemple : bouteilles de PET transparentes.

➤ **Le tri** : La récupération des matières plastiques dans les déchets municipaux mélangés, demande actuellement beaucoup de main-d'œuvre et il faudra se concentrer sur la mise au point de systèmes automatisés économiques. La capacité à séparer les matières plastiques pour un coût raisonnable est un facteur clef dans le développement éventuel d'une technologie de recyclage. Il s'agit de séparer la fraction plastique des autres fractions à savoir : les papiers, les textiles, les métaux et les verres et de séparer ensuite les différents types de matières plastiques. Il s'effectue généralement en plusieurs étapes :

◆ Le tri généralement manuel sur un tapis convoyeur.

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

◆ Le lavage.

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

◆ La séparation par voie chimique peut également parfois permettre d'extraire préférentiellement un polymère du mélange de déchets par dissolution et précipitation différentielle. Cette technique de recyclage semble aisée, mais elle se heurte à de nombreux problèmes. En effet, les méthodes de séparation et de tri des matières plastiques sont onéreuses et ne se justifient que pour des produits d'un coût élevé [1].

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

Il peut s'avérer pratiquement ou économiquement intéressant de recycler des déchets plastiques sous forme de mélanges contenant deux produits ou plus ; le problème est que les polymères impliqués sont généralement incompatibles, lorsqu'on veut faire un mélange, on essaye de disperser au mieux une phase dans l'autre. Pour cela, on est parfois amené à utiliser un composé supplémentaire qui permettra de compatibiliser le mélange en améliorant ses propriétés [2]. Plusieurs causes peuvent expliquer les problèmes de mise en pratique du recyclage des matières plastiques en mélanges :

➤ Le contrôle de la source des déchets est délicat, mais semble indispensable pour connaître la composition précise des déchets, de sorte à traiter des mélanges de composition reproductible.

➤ La plage de température de mise en œuvre d'un plastique est souvent limitée. Quand il s'agit de mélanges, le choix de la température de transformation est critique car elle est liée à la

dégradation et au comportement à l'état fondu, un mauvais choix peut entraîner des altérations de propriétés dans le mélange final (Figure III.1.).

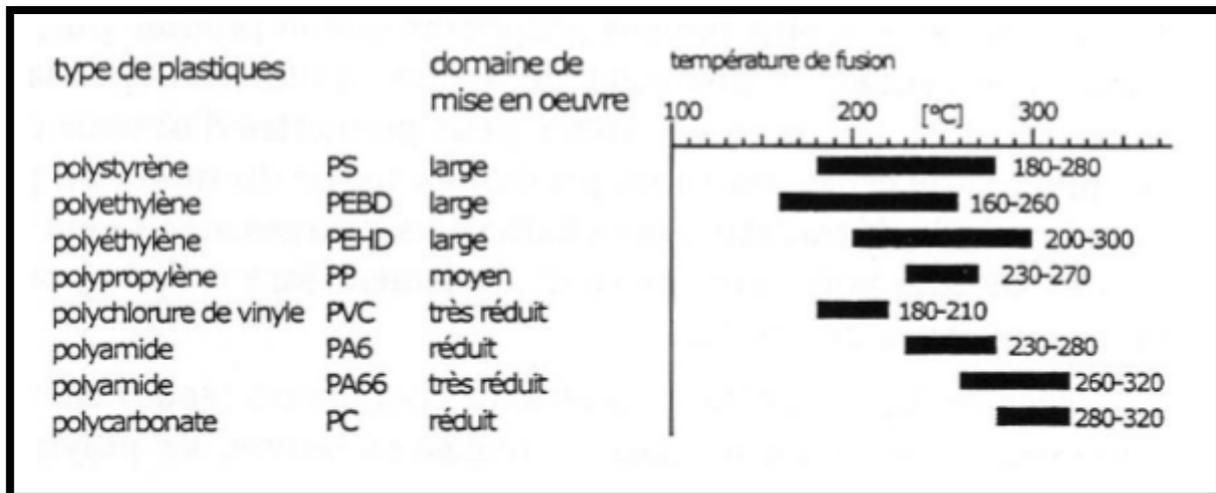


Figure III .1. Plages de températures de mise en œuvre des principaux plastiques [2].

Les plastiques se subdivisent en des nombreuses classes différentes aux caractéristiques souvent incompatibles. C'est la maîtrise de la compatibilité des matières plastiques qui devrait permettre d'effectuer, durant la conception de produits (automobiles, appareils électriques, ...) des choix de matières intégrant leur 'cycle de vie' complet (particulièrement leur recyclage en fin de vie).

III.2. Les stratégies de revalorisation des polymères recyclés

Il apparait donc que les matériaux recyclés obtenus présentent des propriétés dégradées, qu'ils soient recyclés seuls ou en mélanges. Par conséquent, pour rendre viable le recyclage mécanique, différentes stratégies de revalorisation des propriétés des matériaux recyclés [3].

III.2.1. La stratégie de restabilisation

La technique de restabilisation ne permet pas d'améliorer à proprement parler les propriétés des polymères recyclés, mais empêche, ou ralentit plutôt, leur dégradation ultérieure. Elle consiste à rajouter des stabilisants (thermiques, UV, de mise en œuvre ...) qui auront pour effet de « rajeunir » les matériaux recyclés et/ou d'empêcher leur dégradation lors d'étapes de transformation ultérieures [4,5]. 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 polyoléfinés [6]. Le concept de reconstruction (rebuilding), proposé par l'équipe de la Mantia [7,8]. Prolonge celui de la stabilisation et propose de modifier la structure chimique du polymère recyclé, de façon à améliorer ses propriétés. Il s'agit donc d'incorporer certains additifs chimiques pendant le recyclage

mécanique, typiquement des générateurs de radicaux libres, susceptibles d'induire des branchements moléculaires, des réactions de réticulation, et donc d'augmenter les masses molaires et d'améliorer ainsi les propriétés mécaniques. Cette stratégie a été appliquée avec succès par exemple sur le PE recyclé et le PET recyclé, sur lequel des allongeurs de chaîne ont été greffés en extrusion réactive [9,10].

III.2.2. La stratégie de dopage

Cette stratégie consiste à « doper » les propriétés des polymères recyclés en leur ajoutant des charges organiques, fibres naturelles, cellulosiques ou autres charges organiques ou inorganiques [11,12]. Comme dans tous les systèmes composites à base de polymères, la compatibilisation de la charge avec la matrice polymère est un point crucial pour les propriétés finales du composite. Les composites à matrices polymère recyclé et à charges naturelles ont connu un certain succès, dans la mesure où ils constituent des matériaux à faible impact environnemental [13]. Il est intéressant de noter que certaines études ont montré que des matrices polymères recyclés, du fait de la présence d'impuretés, pouvaient dans certains cas avoir une meilleure compatibilité avec les charges organiques et/ou réduire la reprise en eau de ces composites [14].

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

La dernière stratégie, largement étudiée, repose sur le concept de valorisation par voie de mélange. Paul et al remarquant que les mélanges dont la composition était déterminée directement par les proportions des matières dans les gisements de déchets donnaient des propriétés fortement dégradées, proposent de modifier la composition du mélange et de la déplacer vers une zone de composition offrant de meilleures propriétés. Une façon relativement simple et classique de faire cela est de mélanger le polymère recyclé avec du polymère vierge, de façon à ajuster la composition [15]. C'est en particulier une méthode classique pour recycler les rebuts industriels. Il faut souligner que l'objectif de la valorisation de déchets recyclés par voie de mélange a motivé de nombreuses recherches sur les mélanges, en particulier le lien entre composition et propriétés de mélanges. De manière à rendre l'étude plus facile et plus précise, il est classique de mener une étude préliminaire sur des polymères vierges (non recyclés) [16]. Cela permet en particulier de s'affranchir des problèmes de contamination et de dégradation, et d'éliminer l'étape de broyage et lavage, nécessaire avant la transformation des déchets recyclés. Néanmoins, il est clair que cela ne constitue qu'une première étape lors de laquelle l'objectif fixé en terme de propriétés doit absolument être atteint, et que ce succès ne garantit aucunement le succès ultime avec la matière recyclée. Enfin, une stratégie très répandue pour améliorer les propriétés mécaniques de mélanges de polymères immiscibles demeure la compatibilisation [17]. Une procédure de compatibilisation

efficace existe pour la plupart des couples de polymères et de nombreux mélanges compatibilisés de polymères sont commercialisés. Un agent de compatibilisation peut être ajouté au mélange comme un troisième composant où être créé in situ lors d'un procédé réactif. Le compatibilisant ajouté doit migrer à l'interface, réduire la tension interfaciale et la taille de la phase dispersée, et/ou augmenter l'adhésion interfaciale, contribuant à une amélioration des propriétés mécaniques. La compatibilisation de mélanges de déchets polymères est néanmoins plus complexe, car on a affaire à des polymères dégradés, et l'étape de compatibilisation doit être peu coûteuse et relativement simple [18].

III.3. Présentation des polymères valorisés

Parmi les polymères présents dans les DEEE, certains font partie de la famille des polymères dits « techniques ». Il s'agit, de l'ABS, et de PC/ABS. Nous avons choisi dans ce mémoire d'étudier le recyclage de l'ABS pour plusieurs raisons. Enfin, le recyclage de ce matériau très technique a été encore peu étudié. Ces particularités apportent de grandes opportunités de remise sur le marché de l'PC/ABS recyclé en tant que matière première secondaire [19].

III.3.1 Polycarbonate

III.3.1.1. Présentation du PC

Le PC a reçu ce nom parce qu'il fait partie de la famille des polymères ayant des groupes fonctionnels liés entre eux par groupes de carbonate dans une longue chaîne moléculaire [19]. Ce matériau, difficilement inflammable a été découvert en 1953 par trois chercheurs travaillant pour Bayer AG, Schnell, Bottenbruch et Krimm, et sa première mise sur le marché a été 1958. Il est commercialisé sous plusieurs noms : Makrolon de Bayer SA, Lexan de Sabic, Xantar de DSM ou Durolon d'Unige.

III.3.1.2. Synthèse du PC

Le PC, dont la formule moléculaire est donnée sur la Figure III.2., est un thermoplastique linéaire amorphe dont le monomère est le carbonate. Il est obtenu par synthèse du bisphénol A et du phosgène [20]. Il y a deux méthodes possibles pour fabriquer le PC.

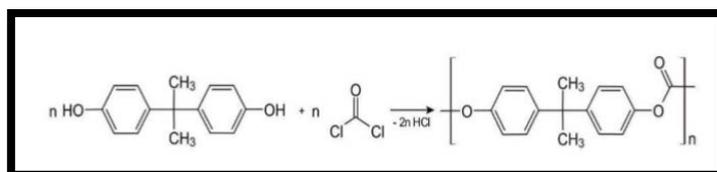


Figure III.2. Synthèse du PC de bisphénol A [20].

♦ La polycondensation

C'est la méthode la plus répandue et 95% des PC sont produits par cette chimie de polymérisation. Une solution aqueuse de bisphénol A et de soude réagit avec du phosgène. L'usage du phosgène doit être contrôlé pour limiter le coût de la production du PC [19].

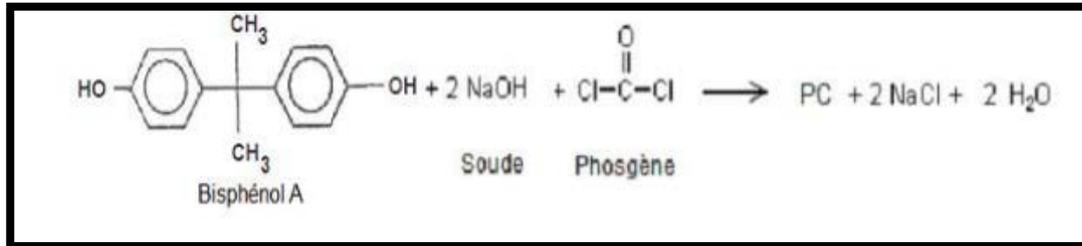


Figure III.3. Schéma de synthèse du PC par polycondensation du Bisphénol A avec le Phosgène [21].

♦ La transesterification

C'est une méthode qui fait intervenir le bisphénol A avec du carbonate de diphenyle, en présence d'un catalyseur et à chaud (150° à 350°) [19]. La méthode est donnée sur le schéma de la Figure III.4 ci-dessous :

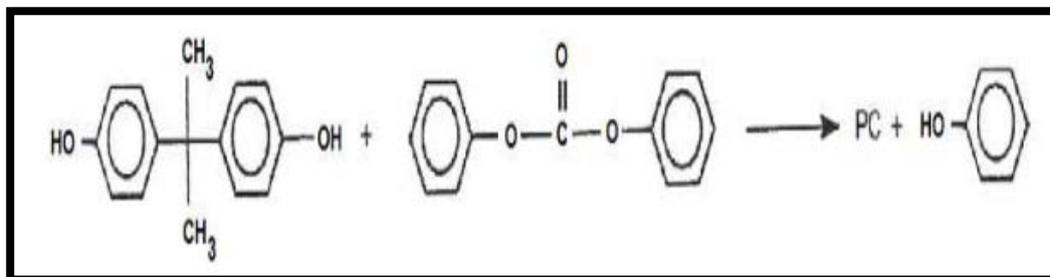


Figure III.4. Schéma de synthèse du PC par transesterification [19].

III.3.1.4. Mise en œuvre du PC

Le PC peut se mettre en œuvre par injection, extrusion, thermoformage ou moulage. Avant toute mise en œuvre, le PC doit être étuvé à 120°C pendant au moins 4 heures [22]. L'injection-moulage se fait à des températures comprises entre 280°C et 320°C. La température du moule se situe entre 80 et 120°C. Le profil de température en extrusion est décroissant le long de la vis, de 300 à 270°C.

III.3.1.5. Le marché du PC

Suite à un important développement de la consommation mondiale au cours de la dernière décennie, la consommation mondiale de PC est croissante : de 0,47 million de tonnes en 1987, elle atteint 1,3 million de tonnes en 1998 dont 15 % d’alliages puis de 2,7 millions de tonnes en 2005 [23]. La consommation du PC est répartie en plusieurs secteurs d’activités, celle de 2009 et donné sur la Figure III.7.

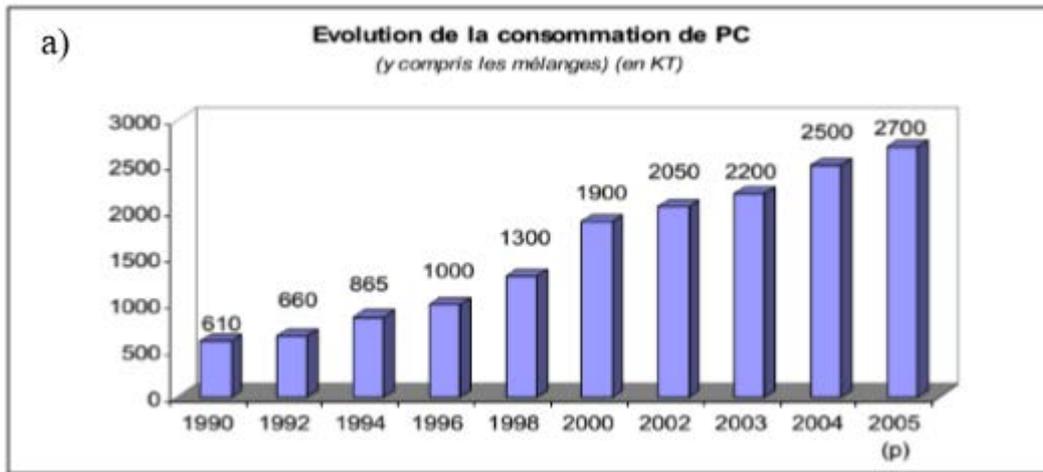


Figure III.5. L’évolution de la consommation du PC entre 1990 et 2005 [23].

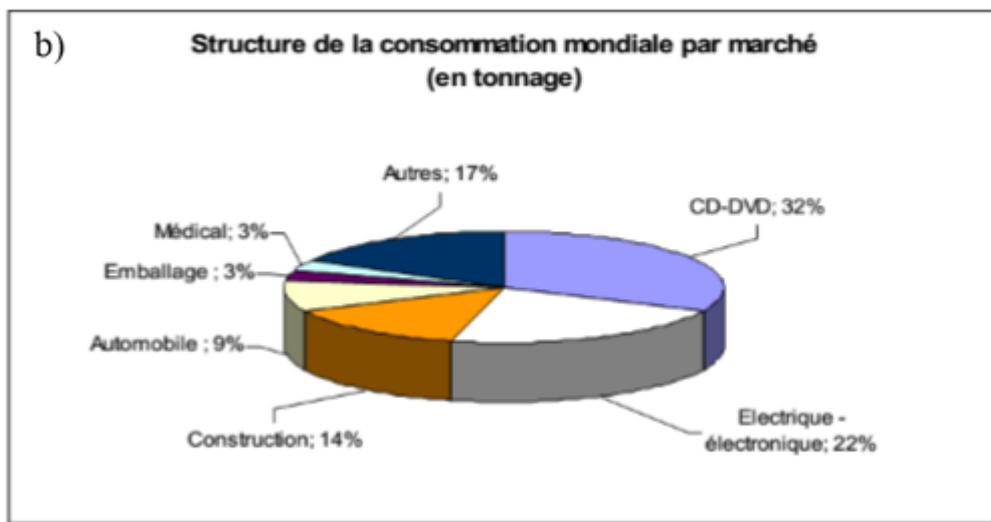


Figure III.6. Répartition de la consommation du PC par secteur d’activité [24].

III.3.1.6. Les Propriétés du PC

III.3.1.6.1. Propriétés physiques

La très grande transparence de cette matière est exploitée pour la fabrication de verres optiques, des CD et DVD, des lentilles de caméras thermiques (caméras IR) ou encore de vitres de phares automobiles. En forte épaisseur, le PC possède une légère teinte jaune.

Les propriétés physiques de PC sont résumés ci-dessous :

- Excellente transparence
- Polymère à haut poids moléculaire

III.3.1.6.2. Propriétés Mécaniques

Le PC est utilisé essentiellement pour sa dureté, sa très grande résistance aux chocs et sa transparence, les propriétés mécaniques du PC sont en fonction de la structure moléculaire, de la masse molaire, des groupes terminaux, des méthodes de fabrication et du vieillissement physique. Les principales propriétés mécaniques du PC sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques du PC [24].

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

III.3.1.6.3. Propriétés Chimiques

Le PC est sensible à l'hydrolyse, mais résistant à l'eau jusqu'à 60°C. Les composés chimiques qui dégradent le PC sont les cétones, les acides concentrés, les hydrocarbures aromatiques et halogénés, et les bases fortes. Le PC est insensible aux acides dilués, aux alcools, aux graisses, aux huiles, et aux hydrocarbures aliphatiques [25].

III.3.1.6.4. Propriétés électriques

La permittivité relative du PC reste quasi inchangée entre -20°C et +140°C, c'est-à-dire dans tout l'intervalle des températures d'utilisation des PC. Cependant, la permittivité relative baisse légèrement lorsque la fréquence augmente. Les PC sont d'excellents isolants dans tout l'intervalle de température dont relèvent les applications pratiques [26].

III.3.1.6.5. Les propriétés thermiques

Le PC présente trois transitions thermiques :

- Tenue thermique excellente.
- Bonne propriétés diélectrique et électrique.
- La transition δ associée aux mouvements internes de motifs PC, se situant vers 100°C. La T_g , se trouve dans le domaine de température : 140 à 150°C.

III.3.1.6.6. Propriétés dimensionnelle

Comme tous les polymères amorphes, le PC offre un retrait limité au démoulage (inférieur à 0,6 %). Sa faible reprise d'humidité lui assure une bonne stabilité dimensionnelle en ambiance humide. Le PC a une bonne tenue au fluage surtout quand il est renforcé de fibres de verre.

III.3.2. Acrylonitrile butadiène styrène**III.3.2.1. Présentation de L'ABS**

L'ABS est un polymère thermoplastique qui appartient à la famille des polymères styréniques. L'ABS est un terpolymère de longue chaîne d'unités chimiquement liées entre elles, obtenu par copolymérisation de trois monomères distincts : le styrène, butadiène et d'AN qui sont des unités de base répétées pour former un matériau polymère (ABS) [27].

III.3.2.2. Structure de L'ABS

L'ABS nécessite deux étapes de polymérisation pour produire la structure finale du polymère. La concentration de chaque monomère varie en fonction du produit recherché, mais généralement l'ABS contient entre 15 et 35 % d'AN entre 40 et 60 % de styrène, ainsi qu'entre 5 et 30 % de butadiène [28]. La production de ce polymère nécessite donc la synthèse de deux copolymères, qui subissent par la suite une polymérisation en présence d'AN [27]. La formule chimique de l'unité répétitive l'ABS est illustrée sur la Figure ci-dessous :

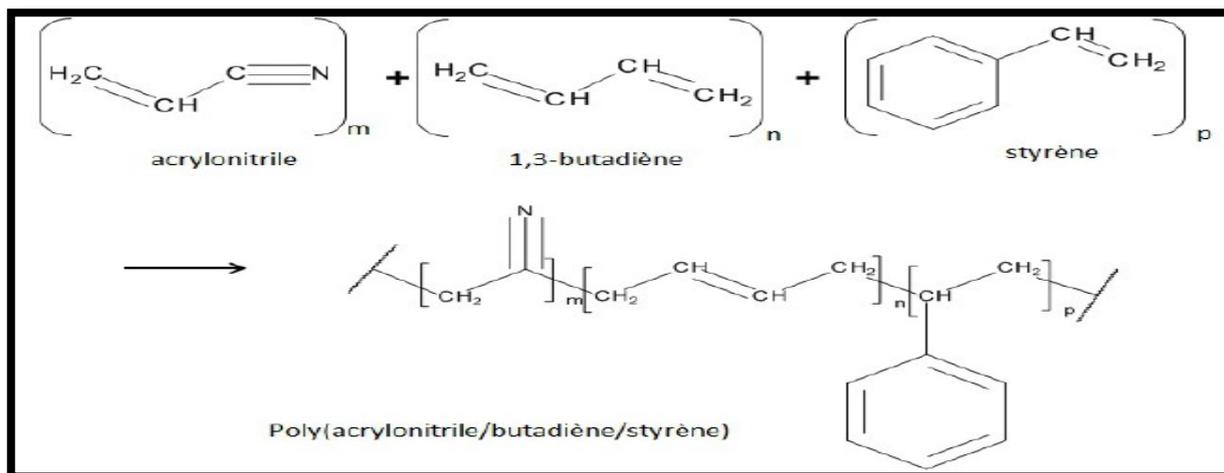


Figure III .7. Formule chimique de l'unité répétitive l'ABS [27].

III.3.2.3. Synthèse

La polymérisation nécessaire pour assembler les trois monomères en ABS est de type radicalaire, soit une polymérisation en chaîne. Cependant, le processus de synthèse ne forme pas le polymère directement à partir de ces molécules, des étapes doivent être réalisées en amont. La réaction de polymérisation des copolymères se produit à 180 °C où le SAN est sous forme solide et le AN sous forme de caoutchouc. Les molécules qui forment la structure de l'ABS se positionnent de façon perpendiculaire ; elles possèdent des liaisons polaires, ce qui contribue à la bonne résistance globale du polymère. Le styrène est responsable de l'apparence brillante du plastique, la concentration de celui-ci varie donc en fonction de l'utilisation qui sera faite du produit [27].

III.3.2.4. Caractéristiques mécaniques et physicochimiques de L'ABS

Les ABS peuvent contenir divers additifs qui vont définir des grades d'ABS [28] : ABS ignifuges, ABS antistatiques, ABS renforcés par des fibres de verres, etc. Les propriétés et performances de l'ABS sont majoritairement dépendantes de certains paramètres de structure : taille et distribution des particules d'élastomère, composition, masse molaire de la phase SAN [28]. L'ABS est couramment utilisé pour sa mise en œuvre aisée, sa grande rigidité, sa résistance à la chaleur et sa résistance au choc.

➤ Propriétés physiques

◆L'aspect de L'ABS

L'ABS est opaque, mais il existe toutefois des grades d'ABS transparents dans lesquels un autre monomère est ajouté : le MMA [29]. La brillance est une propriété qui peut être appréciée pour certaines applications. Elle est liée à des paramètres structuraux comme la composition en AN

greffé et la taille des particules d'élastomères. Plus la taille des particules diminue, plus la brillance diminue. Cette propriété est fonction également des conditions d'injection. Ainsi, une vitesse d'injection, une pression d'injection et une température de moule élevées font augmenter la brillance [29].

◆ Résistance au choc de l'ABS

Résistance au choc de l'ABS dépend fortement de [29] :

La phase discontinue : composition en butadiène, morphologie et taille des particules d'élastomère, densité de réticulation des particules d'élastomère et température de transition vitreuse.

- La matrice : masse moléculaire et composition.
- L'adhésion élastomère – matrice.
- La température d'essai.

Une augmentation du taux de polybutadiène jusqu'à une valeur seuil entraîne toujours une augmentation de la résistance au choc. Les grades de l'ABS sont ainsi répartis en trois catégories [30] :

- Mi- choc pour les ABS contenant 10% à 14% de butadiène.
- Choc pour ceux ayant 14% à 18 % de butadiène.
- Super choc pour ceux ayant 18% à 25 % de butadiène.

➤ Propriétés mécaniques en traction

Les propriétés mécaniques en traction dépendent de la composition du matériau et de la température d'essai [30]. La limite élastique, le module d'Young et l'allongement à la rupture augmentent quand la teneur en AN de la matrice SAN est plus importante que le pourcentage d'AN greffé. Cependant, la limite élastique et le module d'Young diminuent quand le taux de polybutadiène croît. Plus la température baisse, plus la contrainte au seuil d'écoulement et le module d'Young augmentent, et l'allongement à la rupture diminue.

➤ Propriétés électriques

Les ABS sont de bons isolants. Ils ne sont pas conducteurs, mais accumulent les charges électriques. Afin de réduire l'accumulation des charges surfaciques, des additifs antistatiques sont ajoutés durant le mélangeage. Ils sont peu compatibles avec le polymère, et peuvent donc diffuser dans le polymère jusqu'à la surface. Les propriétés électriques de l'ABS sont constantes sur un large domaine de fréquences et ne sont pas affectées par la température et l'humidité [30].

➤ Propriétés thermiques

Un autre monomère peut être ajouté à l'ABS pour augmenter la tenue à la chaleur est le méthylstyrène. Il existe différentes températures caractéristiques des polymères : TFC, et de Tg. Un classement peut être fait en fonction de la température de ramollissement Vicat sous une charge de 1 kg. La tenue à la chaleur est fonction de la composition de l'ABS. Ces températures thermomécaniques sont proches de la Tg [31].

➤ Propriétés chimiques**◆Tenue au feu**

Les ABS sont combustibles quand ils sont exposés à de très hautes températures. Ils brûlent avec flammes et fumées, mais sans gouttes enflammées. La tenue au feu des ABS est obtenue par l'ajout de retardateurs de flammes.

La majorité de ces additifs sont halogénés, souvent à base de brome ou de chlore combinés avec de l'oxyde d'antimoine. Ces composés sont très efficaces, mais génèrent des dioxines et des furanes très toxiques, et des acides (HCl et HBr) très corrosifs en milieu humide. En respect de la directive européenne RoHS, des RF non halogénés et moins nocifs pour l'environnement sont de plus en plus utilisés. Ces composés peuvent être à base d'azote ou de phosphore (le PC contient notamment des RF à base de phosphore). L'efficacité des composés bromés est toutefois supérieure à celle des composés non halogénés. C'est pourquoi leur emploi reste limité, malgré la pression environnementale [28].

III.3.2.4. Mises en œuvre de l'ABS

Avant toute mise en œuvre, l'ABS, légèrement hygroscopique, doit être étuvé à 80-85°C pendant 2 à 4h [29]. Les ABS peuvent se mettre en forme par extrusion, injection, thermoformage et par soufflage. En injection-moulage, les températures sont comprises entre 200°C et 300°C, température qui est fonction du grade de l'ABS (standard, chaleur...). La température du moule doit être comprise entre 40°C et 70°C. En extrusion, la température de travail se situe dans la gamme 210°C – 250°C en sortie de filière [29].

Chapitre III Revalorisation des déchets plastiques styréniques

Référence bibliographiques

- [1] Mohammedi A. (2016). "Thèse de doctorat de Valorisation Par Recyclage Des Déchets Polymériques Issus Des Équipements Électriques et Électroniques".
- [2] Tasnim K. (2003). "Thèse de doctorat Étude de Mélanges PE/PS Contribution au Recyclage".
- [3] Vilaplana F and Karlsson S. (2008). "Quality Concepts for the Improved Use of Recycled. Polymeric Materials: A Review". *Macromolecular Materials and Engineering*, 293(4), pp 274-297.
- [4] Pospíšil J and Sitek R. (1995). "Pfaendner, Upgrading of recycled plastics by restabilization—an overview". *Polymer degradation and Stability*, 48(3), pp 351-358.
- [5] Pfaendner R. (1995). "Recycling and restabilization of polymers for high quality. Applications". An Overview. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 232(1), pp 193-227.
- [6] Tsenoglou C. (2001). Modeling the role of stabilizing additives during melt recycling of high-density polyethylene". *Journal of Applied Polymer Science*, 80(12), pp 2207-2217.
- [7] Mantia F and Tzankova N (2005). "Processability and Properties of ReGraded, Photo-Oxidized Post-Consumer Greenhouse Films". *Macromolecular Materials and Engineering*, 290(10), pp,970-975.
- [8] Scaffaro R., Tzankova N., Dintcheva F. (2006). "La Mantia, On the effectiveness of different additives and concentrations on the re-building of the molecular structure of degraded polyethylene". *Polymer Degradation and Stability*, 91(12), pp 3110 -3116.
- [9] Scaffaro R., Mantia F., Tzankova D. (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*, 43(7), pp 2947-2955.
- [10] Kiliaris P., Papaspyrides C., Pfaendner R. (2007). "Reactive-extrusion route for the closed-loop recycling of poly (ethylene terephthalate). *Journal of Applied Polymer Science*, 104(3), pp 1671-1678.

Chapitre III Revalorisation des déchets plastiques styréniques

- [11] Mantia F. (2004). "Green composites of organic materials and recycled postconsumer polyethylene". *Polymer International*,53(11), pp 1888-1891.
- [12] Sahnoune F., Lopez C., Crespy A. (2003). "Improvement of the mechanical properties of an HDPE/PS blend by compatibilization and incorporation of CaCO₃", *polymer Engineering & Science*, 43(3), pp 647-660.
- [13] Vilaplana F., Strömberg E., Karlsson S. (2010). "Environnemental and resource aspects of sustainable biocomposites". *Polymer Degradation and Stability*,95(11), pp 2147-2161.
- [14] 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*,35(11), pp 1267-1276.
- [15] Paul D., Vinson C., Locke C. (1972). "The potential for reuse of plastics recovered from solid wastes". *Polymer Engineering & Science*, 12(3), pp 157-166.
- [16] Mantia F. (1998). "Reprocessing and Properties of Homopolymer Blends of Virgin and Recycled Polymers, in *Frontiers in the Science and Technology of Polymer Recycling*" Springer, pp 371-385.
- [17] Koning C. (1998). "Strategies for compatibilization of polymer blends". *Progress in Polymer Science*, 23(4), pp 707-757.
- [18] Radusch H., 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*", Springer, pp 153-189.
- [19] Brydson J. (1999). « *Plastics Materials Seventh* », Edition Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-4132-0. ISBN 0-7506-4132-0.
- [20] Labisi M and Show L. (1979). " Robeson, polymer". *Polymer mixibility Academic*: (N.Y).
- [21] Oswln C. (1975). « *Plastic Films&Packaging* », Applied Science Publisher LtdLondon.
- [22] Jousset J. (1968). "Matière Plastique", Tom III, P.211, Dound, paris.
- [23] site électronique « <http://mcgroup.co.uk/researches/polycarbonate-pc> » consulté le 22-11-14.

Chapitre III Revalorisation des déchets plastiques styréniques

- [24] Pham H., Munjal S., Bosnyak S. (1997) "Polycarbonate, Handbook of thermoplastique". Ed. OLABISI O, pp 609-631.
- [25] Dumont M. (2007). "Polycarbonates, Plastiques et Composites, Techniques de l'ingénieur AM"3, page 381.
- [26] Carreja M., Agassant J., Biron F M et al. (2000)."Matériaux industriels - Matériaux polymères", Ed. DUNOD.
- [27] Zhao Z., Wang C., Yang J et al. (2009). " Effect of rubber types on synthesis, morphology, and properties of ABS resins". Polymer Engineering & Science, 49(11), pp 2249-2256.
- [28] Bitsch B. (2003). "Amélioration des thermoplastiques - Role du compounder, Plastiques et Composites". Techniques de l'ingenieur AM3, page 238.
- [29] Chang C., David B., Ray C et al. (1997). "Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) polymers, Handbook of thermoplastics". Ed, OLABISI O, pp 135-153.
- [30] Maul J., Frushour B., Kontoff J. et al (2001). "Polystyrene and styrene copolymers, Industrial Polymers Handbook Products, Processes, Applications", Ed. WILKS E.S, pp 789-864.
- [31] Carrot C and Guillet J. (1999). " Viscoelasticite lineaire des polymeres fondus". Techniques de L'ingenieur, AM 3, page 620.

Chapitre IV : Revue bibliographique

Ce chapitre présente un bref aperçu sur les différents articles qui se sont intéressés à l'amélioration des propriétés mécaniques, morphologiques et la compatibilité des mélanges du PC/ABS.

Kuram E. [1] a étudié dans son travail l'influence de la teneur et du type de charge sur les propriétés mécaniques, morphologiques et rhéologiques du PC/ABS. Le renfort (fibre de verre) à rapport d'aspect élevé et la charge lamellaire (talc) ont été retenus comme charges minérales. Ces charges ont été ajoutées au mélange PC/ABS ou dans des compositions mélangées à différents pourcentages en poids pour développer des composites hybrides. Les composites de PC/ABS, de talc et de fibre de verre ont été produits en utilisant une extrudeuse à double vis co-rotative. Les échantillons pour les tests ont été produits à partir des composites par le procédé de moulage par injection. La résistance à traction, la déformation, la résistance à la flexion, la déformation à la flexion, la résistance aux chocs et IFC ont été déterminés pour tous les matériaux composites. Dans le cas d'une seule charge minérale, il a été conclu que la fibre de verre était la meilleure pour améliorer les résistances à la traction et à la flexion, mais cela a détérioré la résistance au choc. L'ajout de talc à un mélange PC/ABS pur a amélioré la résistance à la traction mais affaibli les résistances à la flexion et au choc. Pour les composites hybrides, la plus haute résistance à la traction a été obtenue avec la teneur de 10 % en poids de talc et de 15 % en poids de fibres de verre (PC/ABS10T+15GF). Un composite hybride comprenant 7,5 % en poids de talc et 15 % en poids de fibre de verre (PC/ABS7.5T+15GF) a donné la résistance à la flexion la plus élevée parmi tous les composites hybrides. La résistance au choc la plus élevée parmi tous les composites hybrides a été obtenue avec un composite contenant 7,5 % en poids de talc et 5 % en poids de fibre de verre (PC/ABS+7.5T+5GF). L'ajout de talc ou de fibre de verre au mélange PC/ABS a induit une réduction de la valeur IFC et la baisse a été plus spectaculaire avec l'incorporation de fibre de verre par rapport au talc. D'après l'observation morphologique, un décollement interfacial fibre de verre/matrice, une rupture des fibres et des fibres de verre arrachées ont été détectés sur les surfaces fracturées des composites. En conséquence, l'ajout de charges minérales (talc ou fibre de verre) avec des ratios pondéraux adaptés a amélioré les propriétés mécaniques du mélange PC/ABS pur.

Lu Y et al. [2] Les plastiques micro-cellulaires ont non seulement d'excellentes performances, mais peuvent également former des parties murées. Dans le papier, les parties micro-cellulaires à parois minces (ordinateur portable) composés de mélanges PC/ABS étaient préparés par moulage par injection de mousse avec de l'azote supercritique. Les morphologies étaient observées au microscope optique, au MEB et au profileur optique. Les propriétés (macro-densité, ténacité aux

chocs, conductivité thermique) des échantillons ont été étudiés plus en détail. Les résultats ont montré que le diamètre moyen des cellules de la mousse du PC/ABS était de 0,401 mm La densité cellulaire a atteint 3,25 dix 12 cellule/cm³. Comparé à la partie non expansée, la macro-densité de la partie micro-cellulaire a été réduite de 10,9%. La résistance au choc de la mousse du mélange PC/ABS a atteint 19,9 kJ / m, soit environ 2,7 fois plus que celle de la partie non moussée. Cela peut être attribué au fait que la structure micro-cellulaire pourrait absorber l'énergie d'impact résultant de l'amélioration de la ténacité. La structure micro-cellulaire pourrait également réduire la conductivité thermique de la mousse PC/ABS. En bref, une partie micro-cellulaire de la paroi mince du PC/ABS avec un poids léger et une bonne ténacité pourrait être formée par moulage par injection avec de l'azote supercritique.

Debbah I et al. [3] ont étudiée l'effet du compatibilisant de (SEBS-g-MAH) sur les différentes propriétés. Pour cela, des mélanges de PC/ABS à différents rapports, sans et avec des concentrations variables de compatibilisant ont été préparés par mélange à l'état fondu dans une extrudeuse double vis co-rotative suivie d'un moulage par injection. L'efficacité du compatibilisant était étudié la microstructure et les propriétés mécaniques, thermiques et rhéologiques des mélanges. Il a été constaté que l'ajout du compatibilisant augmente la résistance à la traction, le module d'élasticité, l'allongement à la rupture, la résistance au choc, η^* et la stabilité thermique. Ces effets ont été notés à une charge de 1% en poids de compatibilisant, où des interactions améliorées entre le PC et l'ABS ont pu être observées. Les méthodes rhéologiques, basées sur des tests viscoélastiques dynamiques, nous a permis de distinguer la morphologie en émulsion et la morphologie co-continue.

Duan H et al. [4] ont testé deux compatibilisants, SAG avec différents taux de (1% de GMA et 5% de GMA) et le SAN greffé à 2% de SAM. Ils ont remarqué pour les mélanges modifiés par SAG ont une légère augmentation de la résistance traction par rapport aux mélanges compatibilisés par le SAM. D'autre part, la résistance à l'impact et la HDT ont été améliorées par l'addition du SAG. L'étude par MEB a révélé que la morphologie des mélanges de PC/ABS modifié par le SAG et nettement améliorée par rapport à celle modifiée par SAM. Les auteurs ont expliqué ceci par le fait que la réaction entre le groupement carboxylique ou le groupement époxy de SAG avec le groupement carboxyle du PC est responsable de l'amélioration des propriétés mécaniques et morphologiques.

Aid S et al. [5] se sont intéressés à l'étude de la miscibilité de deux polymères : ABS composé d'un polymère élastomère dispersé (caoutchouc PB) noyé dans une matrice thermoplastique SAN et le PC. À noter que l'obtention de mélanges de polymères miscibles est souvent une tâche difficile en

raison de la grande taille de leurs chaînes moléculaires et de la tension interfaciale élevée entre les phases polymères. Jusqu'à présent, les nombreuses recherches développées dans ce domaine concernent les polymères mélangés obtenus par des techniques de compatibilisation afin d'améliorer l'adhérence interfaciale entre les polymères initiaux. Le but de ce travail consisté à étudier la miscibilité entre l'ABS et PC. Tout d'abord, deux méthodes différentes ont été utilisées pour mélanger les polymères : l'extrusion et la dissolution dans un solvant commun c'est-à-dire le THF. Puis, une observation physico-chimique, microscopique et une caractérisation rhéologique ont été effectuées sur des échantillons de mélanges obtenus à la fois par un traitement par extrusion et un procédé de dissolution. La mesure de la Tg par DSC et ADTM a montré une miscibilité partielle entre les deux polymères.

Bärwinkel S et al. [6] ont étudié la formation de la morphologie pendant le mélange, ainsi que par le moulage par injection de mélanges contenant 60% en poids de (PC) et 40% en poids d'ABS modifié par du caoutchouc PB copolymères. La morphologie a été étudiée par MET. Le profil de la morphologie du mélange a été enregistré à partir des spécimens moulés par injection et un gradient de morphologie significatif a été observé entre leur peau et le noyau. La couche superficielle inférieure à 10 μm d'épaisseur montre une forte dispersion de la phase de SAN sous forme allongée à l'échelle nanométrique (en forme de stries). Les particules de caoutchouc PB greffées au SAN sont suivies d'une couche de peau épaisse d'un de 50-150 μm d'épaisseur dans laquelle la morphologie du polymère est caractérisée par des phases lamellaires SAN/ABS. L'épaisseur de ces lamelles augmente avec la distance de la surface de l'éprouvette. Au cœur des échantillons, les particules du caoutchouc PB greffés au SAN sont exclusivement présentes dans les phases SAN, qui présentent une morphologie plus grossière, moins orientée, et dispersée par rapport à la peau. Les effets de la viscosité du SAN sur la morphologie des phases du mélange PC/ABS et les corrélations avec les propriétés mécaniques déterminées par des tests de traction et de résistance au choc ont été étudiés. Une évaluation par MEB des surfaces fracturées a également été établie. Un modèle expliquant les mécanismes de formation de la morphologie pendant le moulage par injection de mélanges PC/ABS a aussi été discuté.

Ho M et al. [7] les mélanges PC/ABS ont été largement utilisés dans l'intérieur des véhicules, les pièces électroniques et les accessoires. L'étude des propriétés de fatigue à faible cycle ont été réalisées sur des échantillons moulés par injection de mélange PC/ABS. Les résultats expérimentaux ont indiqué que les conditions optimales de la propriété de fatigue sont la température fusion 200°C, temps de remplissage 6 second et une température du moule 65°C. Lorsque l'amplitude de la déformation est supérieure à 0,0118 $\mu\text{m}/\text{mm}$, le temps de remplissage de

6 second donne les meilleures propriétés de fatigue. Par MEB, près de la zone initiale de la fissure, la surface fracturée montre des fibres courtes et fines. La surface qui est loin de la zone initiale de la fissure, est caractérisée par de longues fibres prouvant une fracture ductile.

Srinivasababu N et al. [8] Les matériaux thermoplastiques acquièrent leurs propriétés caractéristiques en raison de leur capacité à se cristalliser, c'est-à-dire des solides semi-cristallins. De nombreux auteurs ont fait plusieurs efforts pour étudier des mélanges de divers systèmes binaires, tertiaires, etc. pour être compatibles les uns avec les autres et obtenir une amélioration des propriétés cibles. À cet égard, l'ABS, le PC et leurs mélanges sont étudiés pour diverses applications allant du disque compact à diverses pièces pour automobiles. Mais il y a toujours le défi dans la sélection du compatibilisant approprié pour deux ou plusieurs matériaux qui doivent être mélangés. En vue de recyclage des matériaux thermoplastiques comme l'ABS, le PE, le PP et le PC, le développement de leurs mélanges/composites répondra aux besoins quotidiens des générations présentes et futures. Par conséquent, une tentative a été faite dans le présent travail pour faire une revue sur les propriétés mécaniques à savoir : la résistance à la traction, la résistance à la flexion et au à l'impact d'un nouveau matériau mélangé, c'est-à-dire le PC chargé de verre et leurs mélanges avec les résultats existant dans la littérature.

Yanqin Y et al. [9] ont étudié l'effet des compatibilisants SAM et MBS sur les propriétés des mélanges PC/ABS (80/20), les résultats montrent que la contrainte à la rupture et l'allongement à la rupture diminuent avec l'augmentation du MBS, mais n'a pas d'effet sur la résistance à l'impact. L'addition du SAM à un taux de 20% entraîne une augmentation de la résistance à l'impact, par contre aucune amélioration des propriétés en traction n'a été observée. D'autre part, l'observation par MEB a révélé que la dispersion de l'ABS dans les mélanges comptabilisés par SAM est meilleure par rapport aux mélanges non comptabilisés. L'étude par DSC prouve que le SAM est meilleur par rapport au MBS pour la comptabilisation du mélange de PC/ABS.

Asyadi F et al. [10] ont examiné l'effet des charges mica traités et non traités sur les propriétés mécaniques du composites PC/ABS. Les composites ont été préparés à l'aide d'une extrudeuse à double vis et les échantillons par moulage par injection. Les résultats ont indiqué que l'incorporation de mica dans le PC/ABS (70/30) provoque une diminution de la contrainte de traction, de l'allongement à la rupture, et les propriétés d'impact. Il a été observé que le traitement de surface du mica par un agent de couplage sur les composites PC/ABS (70/30) augmente la contrainte de traction, l'allongement à la rupture, et la résistance à la flexion et les propriétés d'impact. Le mica traité est utilisé comme charge dans les mélanges PC/ABS pour améliorer son application dans les secteurs de l'électronique et de l'automobile.

Monemian S et al. [11] une étude systématique a été réalisée sur le comportement morphologique, électrique et rhéologique de type co-continu ou dispersé des mélanges PC/ABS, contenant différentes quantités de MWNT. Les MWNT ont donné des conductivités électriques substantielles à ces nano composites à de très faibles concentrations, en raison de la méthode efficace de traitement par fusion. En raison de la localisation sélective des MWNT dans la phase PC, ainsi que du phénomène de double percolation, le mélange à morphologie co-continue a montré un seuil de percolation électrique et rhéologique plus faible, une viscosité et une élasticité de fusion plus élevées par rapport au système à morphologie dispersée. La morphologie des deux systèmes de mélange a été affinée suite de l'incorporation des MWNT mais le type de morphologie est resté inchangé. Un rôle typique de compatibilisant dans le raffinement de la morphologie du mélange a été observée dans les deux systèmes. La conductivité électrique du système chargé de MWNT en présence de compatibilisant était inférieure à celle des systèmes chargés de MWNT uniquement, ce qui a été attribué au rôle du compatibilisant, et l'influence du compatibilisant sur déplacement des MWNT de la matrice PC vers la phase ABS. Avec changement de la morphologie, la réduction de la conductivité s'est intensifiée. En comparant la micrographie MET du PC/SAN/MWNT avec celle de PC/ABS/MWNT, il a été révélé qu'une petite partie des MWNT était également localisée sur la fraction de caoutchouc PB de l'ABS.

Farzadfar A et al. [12] ont préparés et étudiée les propriétés morphologiques des mélanges de PC recyclé et l'ABS. Pour compatibiliser ces mélanges, l'ABS-g-MAH et l'EVA-g-MAH avec un degré de greffage similaire de 1,5% ont été utilisés. Pour comparer les effets de chaque type de comptabilisant sur les propriétés mécaniques, des mélanges ont été préparés en utilisant 3, 5 et 10 % de chaque compatibilisant. Une extrudeuse à double vis co-rotative a été utilisée pour le mélange. Les résultats ont montré que l'ABS-g-MAH n'avait aucun effet significatif sur la résistance à la traction des mélanges tandis que l'EVA-g-MAH a diminué la résistance à la traction, et la diminution maximale étant d'environ 9,6% en utilisant 10 phr de ce compatibilisant. Les résultats des tests de résistance aux chocs Charpy entaillés ont montré que l'EVA-g-MAH a augmenté la résistance aux chocs des mélanges plus que l'ABS-g-MAH. La valeur maximale de cette augmentation s'est produite lors de l'utilisation de 5 phr de chaque compatibilisant, elle est d'environ 54% pour l'ABS-g-MAH et de 165% pour l'EVA-g-MAH. Les micrographies de MEB ont montré que la taille des particules de la phase dispersée a été diminuée dans la phase continue de PC en utilisant les compatibilisant. En outre, un mélange sans agent comptabilisant a montré un comportement cassant tandis que les mélanges contenant l'agent comptabilisant ont montré un comportement ductile en cas de fracture.

Feyz E et al. [13] se sont intéressés aux propriétés du mélange PC/ABS à diverses compositions. L'ABS a été mélangé au PC pour former un système binaire, et le couple de rotation du Brabender a été réduit, un phénomène qui se traduit par une amélioration de la capacité de traitement du PC. Avec l'augmentation de la teneur en ABS, les propriétés mécaniques du mélange ont augmenté tel que la résistance à la traction, le module, la dureté et le taux de retrait a diminué. Cependant, avec la variation de la composition, la résistance aux chocs Izod montre un maximum, tandis que l'allongement à la rupture présente un minimum. Ces phénomènes sont discutés avec les viscoélasticités dynamiques et la numérisation des résultats morphologiques obtenus par un microscope électronique.

Jeon S et al. [14] ont étudiés les réglementations environnementales qu'exigent l'amélioration de l'efficacité énergétique des automobiles. Ceci peut être réalisé, principalement en réduisant le poids des composants automobiles. Dans cette étude le composite PC/ABS mélangé à des fibres de verre et des fibres métalliques était développé et son adéquation d'application dans les châssis de voitures a été étudiée. Les matériaux d'essai ont été préparés avec diverses teneurs en fibres métalliques en raison des excellentes propriétés mécaniques et électriques des fibres. Dans cette étude, les morphologies des matériaux ont été étudiées pour confirmer la dispersion des charges et les caractéristiques interfaciale entre les charges et le matériau de base. En plus, les caractéristiques mécaniques et électriques des composites à base PC/ABS qui dépendaient de la teneur en fibres métalliques ont été évaluées à l'aide de tests mécaniques (impact, traction et flexion) et des tests électriques tels que les IEM et la résistance de surface. La proportion appropriée des fibres métalliques dans les composites à base de PC/ABS a été déterminées à partir des résultats des tests. Enfin, l'applicabilité des composites à base de PC/ABS dans les châssis de voitures a été évalués par une analyse de réduction de poids et l'analyse coûts-avantages.

Xu Y et al. [15] ont élaboré deux modificateurs d'impact de copolymère de (PBD-g-SAN) avec différentes tailles de particules de caoutchouc qui ont été synthétisés par polymérisation en émulsion. L'ABS été mélangé avec une concentration constante de caoutchouc de 15% en poids et ont été préparés en mélangeant ces modificateurs d'impact et de résine SAN. L'accent principal était mis sur les propriétés mécaniques et les mécanismes de déformation des mélanges ABS sous test d'impact Izod et tension uni axiale à différentes déformations. Par la combinaison du MET et du MEB, les auteurs ont conclu que les craquelures et la cavitation coexistaient dans les mélanges ABS. Les mécanismes de déformation du mélange ABS contenant de grandes particules de caoutchouc étaient principalement celui des cavitations des particules de caoutchouc et le cisaillement de la matrice, y compris les craquelures, qui ne changent pas avec la vitesse de

déformation. Contrairement au mélange l'ABS avec de grosses particules de caoutchouc, dans le mécanisme de déformation sous les conditions de traction de l'ABS avec de petites particules de caoutchouc, seul le cisaillement de la matrice était impliqué et aucune fissure ne s'est formée.

Tang J et al. [16] ont exploré les effets du vieillissement physique d'un mélange PC/ABS (75/25). Le mélange a été étudié en utilisant la DSC et la IRTF. Les résultats de la DSC, ont montré deux distincts pic endothermes à environ 90.8 ° C et 110.8 ° C, qui sont associés à la transition vitreuse des composants ABS (Tg, ABS) et PC (Tg, PC), respectivement. Le vieillissement surveillé à 80.8 ° C pendant plus de 1000 h, les changements de l'enthalpie de relaxation, et les températures de fusion du mélange a suivi des tendances similaires à celles déjà observées dans la littérature pour le PC vieillit entre 125 et 130.8 °C. Le taux de l'enthalpie de relaxation était également comparable. L'endotherme par rapport au temps de vieillissement pour le PC se comportait tout à fait différemment de la relation linéaire connue pour les PC très âgés. L'ABS semble également être insensible au vieillissement. Les deux observations ont été confirmées comme statistiquement significatives en utilisant des méthodes d'analyse de la variance. En utilisant la DSC modulé en température, il est prouvé que le vieillissement augmente la miscibilité du mélange lorsque la Tg du PC se déplace vers la Tg stationnaire de l'ABS au cours du vieillissement. En parallèles les résultats IRTF ont mis en évidences une oxydation du butadiène au cours du vieillissement même à cette température relativement basse, formant un hydroxyle et un carbonyle comme produits de dégradation. La présence d'ABS dans le mélange semble également avoir empêché le passage de l'arrangement trans-cis à trans-trans de la liaison carbonate, qui est un phénomène bien connu au cours du vieillissement à la température du PC seul. De plus, la liaison de carbone semble avoir été à la plus basse énergie, trans-trans, arrangement avant le processus de vieillissement.

Lim J et al. [17] ont étudiée les effets du compatibilisant réactif et la température de traitement sur la morphologie et les propriétés mécaniques au niveau de la ligne de soudure du mélange PC/ABS (60/40 poids/poids). Un terpolymère fonctionnalisée par une fonction amine (amine-SPMIMA) a été utilisé comme agent compatibilisant réactif in situ pour le mélange PC/ABS. Une augmentation de la résistance à la traction de la soudure a été observée avec l'augmentation de la teneur en amine-SPMIMA. La résistance au choc de la soudure a montré une valeur maximale pour le mélange contenant environ 3% d'amine-SPMIMA. La variation des propriétés mécaniques au niveau de la ligne de soudure était corrélée avec le changement de morphologie du mélange.

Srinivasababu N al. [18] ont étudié l'effet de PCL sur les propriétés des mélanges de l'ABS et du PC, les résultats de la ADM montrent que la Tg du mélange PC/ABS (70/30) diminue avec l'augmentation du PCL et suggèrent la miscibilité du PC et de l'ABS, pour la morphologie, la taille des nodules de PC ne change pas avec l'addition du PCL mais réduit la séparation de phase entre le PC et l'ABS. Une augmentation des propriétés mécaniques par l'addition de 0.5 % de PCL a été observée. Les résultats rhéologiques des mélanges de PC/ABS à différente fréquence montrent que le module de stockage, le module de perte et la viscosité complexe augmente avec l'augmentation du PCL, résultats qui sont consistants avec les propriétés mécaniques.

Khan M et al. [19] ont étudié le comportement en rhéologie dynamique à l'état fondu de différents mélanges PC/ABS. Ils ont trouvé que le PC possède le module de perte G'' le plus élevé et l'ABS a le module G'' le plus bas, les autres mélanges ont un comportement similaire à celui de l'ABS pur. Aussi, il a été trouvé, que même à hautes fréquences, le PC présente le module élastique G' le plus élevé alors que les mélanges présentent des modules G' proches de l'ABS. Les mélanges majoritaires en ABS (85% et 70%) présentent des modules élastiques proches de l'ABS, et leurs G' sont plus élevés que celui de l'ABS sur toute la gamme de fréquence. Les auteurs ont conclu que l'addition du PC à l'ABS change le rapport des composants plastiques (PS, AN) et des composants élastiques (PB, PB greffé au SAN) en altérant les interactions entre ces composants.

Zhang X et al. [20] ont synthétisé dans une extrudeuse double vis, de l'ABS-g-MAH avec différents taux de greffage (entre 0 et 2,5% en masse). Ils ont étudié ensuite l'effet du taux de greffage et de la concentration en ABS-g-MAH sur les propriétés mécaniques du mélange PC/ABS, contenant 30% de PC. Les résultats montrent que la résistance à l'impact des mélanges PC/ABS est très basse indiquant une négative déviation entre le PC et l'ABS à cause des faibles interactions interfaciale entre le PC et l'ABS. Par contre l'addition de 10% du compatibilisant améliore largement la résistance à l'impact, ainsi, les auteurs ont constaté que la résistance à l'impact des mélanges PC/ABS augmente avec l'augmentation du degré de l'anhydride maléique puis diminue pour des taux de greffage supérieurs à 1,74%. Une augmentation du degré de greffage est bénéfique pour une possibilité de réaction d'estérification entre l'anhydride maléique de l'ABS et le groupement OH du PC. La réaction in situ se déroule pour former un compatibilisant qui agit comme un agent interfaciale et augmente l'interaction interfaciale du PC/ABS.

Tijon S and Meng Y [21] ont étudié l'effet de l'addition du PP-g-MAH et les résines époxy sur les propriétés mécanique et morphologique des mélanges PC/ABS (70/30). En premier lieu, ils ont mélangé 95% en poids d'ABS et 5% de PP-g-MAH dans une extrudeuse bvis pour obtenir un mélange désigné ABS(M). Ils ont ensuite préparé par extrusion bvis des mélanges à base de PC

comportant des taux d'ABS(M) variant de 10 à 40% et en rajoutant de la résine époxy à différents taux (0,5 ; 1,0 ; et 2,0 phr). Ils ont constaté que l'élongation à la rupture et la résistance au choc sont améliorées avec l'addition de 2 phr d'époxy, d'autre part, l'époxy ne modifie pas la morphologie, mais les interfaces apparaissent de façon moins nette sur les micrographies, pouvant indiquer ainsi une meilleure adhésion interfaciale PC/ABS.

Wildes G et al. [22] ont synthétisé un compatibilisant SAN–amine pour compatibiliser les mélanges de PC/ABS, ils ont remarqué que ce compatibilisant est miscible avec le SAN de l'ABS et le groupement amine secondaire réagit avec le groupement carbonate du PC pour former le copolymère SAN-g-PC. Ce copolymère réside à l'interface du mélange PC/ABS et stabilise la morphologie à des températures élevées par suppression de coalescence.

Balakrishnan S et al. [23] ont utilisé un rhéomètre capillaire pour étudier le comportement rhéologique des mélanges PC/ABS. Ils ont remarqué que la viscosité apparente des mélanges PC/ABS n'est pas une fonction linéaire du taux de PC, et pour des taux en PC compris entre 0 et 65%, elle est inférieure à celle de l'ABS. Les auteurs ont l'expliqué cela par trois phénomènes, la plastification, la dégradation du PC causée par les sels métalliques présents dans l'ABS et les interactions faibles entre le PC et l'ABS.

Chaudhry B et al. [24] ont étudié l'effet des conditions de transformation des mélanges PC/ABS sur la morphologie. Ils ont préparé un mélange PC/ABS (55/45) dans un mélangeur interne à différents temps, températures de malaxage et vitesses de rotation des rotors. Ils ont observé qu'une dispersion bien définis de PC dans l'ABS est obtenus pour des temps courts (1 à 2 minutes) ou des températures basses (230°C), par contre des temps plus longs (5, 7 et 10 minutes) ou des températures plus élevées (250, 270°C) conduisent à une élongation des deux phases et à la formation d'une morphologie quasi co-continue, par contre aucun effet de la vitesse n'est observé. Les conditions de mise en œuvre ont un effet plus marqué sur la morphologie des mélanges de polymères que la composition du mélange et le comportement rhéologique des composants individuels. Les conditions de transformation, en plus d'être décisives pour l'établissement de la morphologie des mélanges de polymères multiphasiques, sont également responsables de la stabilité de la morphologie au cours des étapes de transformation.

Bertin M et al. [25] ont indiqué que la réponse rhéologique de l'ABS dépend fortement de la phase élastomère et plus précisément du degré de greffage des particules de PB. Par conséquent, les réponses des mélanges PC/ABS sont susceptibles d'être influencées par la phase d'élastomère

modifiée et la phase plastique des mélanges. Ceci, à son tour, modifie la morphologie du système, entraînant des variations dans les propriétés rhéologiques et mécaniques.

Greco R et al. [26] se sont intéressés à l'étude de l'influence de la composition sur les propriétés mécaniques des mélanges de PC/ABS. Les résultats confirment l'amélioration de la transformation du PC par l'addition de l'ABS. Le PC possède la limite élastique, l'allongement et la contrainte à rupture les plus élevés. Les mélanges PC/ABS contenant 80 et 90% de PC ont le même comportement ductile en traction que le PC, et ceux dont le pourcentage de PC varie de 50% à 70% rompent de manière fragile. Les mélanges contenant un taux de PC inférieur ou égal à 40% ont un comportement proche de celui de l'ABS. Les auteurs ont trouvé aussi que pour une composition de 20-30% en poids d'ABS, la résilience est multipliée par un facteur de 5, passant d'une rupture fragile pour le PC vierge à une rupture ductile pour les mélanges contenant de faibles taux d'ABS.

Lombardo B et al. [27] ont accentué leurs travaux sur l'étude de l'effet du type d'ABS sur la morphologie des mélanges PC/ABS. Deux types d'ABS synthétisés selon des techniques différentes et présentant des teneurs et des tailles de nodules différentes, ont été utilisés pour préparer des mélanges riches en PC. Le premier ABS a été préparé en masse avec 16% en PB et le deuxième en émulsion avec 55% en PB. Il a été constaté que, lorsque la teneur en butadiène de l'ABS est importante (55%), les nodules forment des agrégats qui confèrent à la phase d'ABS des formes irrégulières.

Dong L et al. [28] ont préparé des mélanges de bisphénol A (PC) et d'ABS dans un appareil de type Brabender et moulé par compression dans une presse. Des surfaces des échantillons lissés par un microtome ont été greffés par deux agents différents : (1) une solution aqueuse de NaOH capable d'hydrolyser le PC seul ; (2) une solution aqueuse d'acides capables d'oxyder l'ABS seul. L'utilisation simultanée des deux méthodes a fourni des informations complémentaires sur la morphologie du mélange.

Lee M et al. [29] ont étudié la morphologie des mélanges de PC/ABS pour différentes compositions. Ils ont remarqué que les compositions riches en PC montrent une phase d'ABS dispersée dans une structure en collier de perle. Avec l'augmentation du taux d'ABS, la structure devient plus dense et plus interconnectée. Une transition a été observée entre 70/30 et 60/40 de la structure en collier de perle à une structure coalescée. Pour la composition 40/60, le PC a formé une phase dispersée avec des inclusions de SAN.

Référence bibliographiques

- [1] Kuram E. (2019). "Hybridization effect of talc/glass fiber as a filler in polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene composites". *Composites Part B : Engineering*, 173, pp 106-954.
- [2] Lu Y., Yang M., Liu J. (2019). " Morphology and properties of thin-walled microcellular polycarbonate/acrylonitrile–butadiene–styrene blend foam". *Journal of Cellular Plastics*, 55(4), pp 421-432.
- [3] Debbah I., Krache R., Aranburu N et al. (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), pp 611-633.
- [4] Duan H., Xi K., Kim Y., Tang J. (2017). " The Role of Compatibilizers on the Properties of PC/ABS Alloy", *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*.,5(6), pp 21-30.
- [5] Aid S., Eddhahak A., Ortega Z., Froelich D et al. (2017). "Experimental study of the miscibility of ABS/PC polymer blends and investigation of the processing effect". *Journal of Applied Polymer Science*, PP 134(25).
- [6] Bärwinkel S., Seidel A., Hobeika S et al. (2016). "Morphology Formation in PC/ABS Blends during Thermal Processing and the Effect of the Viscosity Ratio of Blend Partners". *Materials*, 9(8), page 659.
- [7] Ho M., Wang H., Kuo S. (2015). "Research on the Low Cycle Fatigue Properties of PC/ABS Blend". *Advanced Materials Research*, 1095, pp 938–941.
- [8] Srinivasababu N., Kumar K., Srikar G. (2015). " Mechanical Performance of Polycarbonate/ABS, Glass Filled Polycarbonate Blends – Review". *Applied Mechanics and Materials*, 766(767), pp 27–33.
- [9] Yanqin L., Jieke Z., Ruilong C et al. (2014). "Effect of the Compatibilizers on Polycarbonate (PC) /Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Blend". *American Journal of Materials Research*, 1(3), pp 48-52.
- [10] Asyadi F., Jawaid M., Hassan A et al. (2013). " Mechanical Properties of Mica-Filled Polycarbonate/Poly(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) Composites". *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 52(7), pp 727–736.

- [11] Monemian S., Jafari S., Khonakdar H et al. (2013). "MWNT-filled PC/ABS blends: Correlation of morphology with rheological and electrical response". *Journal of Applied Polymer Science*, 130(2), pp 739–748.
- [12] Farzadfar A., Khorasani S., Khalili S. (2013). " Blends of recycled polycarbonate and acrylonitrile-butadiene-styrene : comparing the effect of reactive compatibilizers on mechanical and morphological properties". *Polymer International*, 63(1), pp 145–150.
- [13] Feyz E., Jahani Y., Esfandeh M. (2011). "Effect of a nanoclay/triphenyl phosphate hybrid system on the fire retardancy of polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene blend". *Journal of Applied Polymer Science*, 120(6), pp 3435–3442.
- [14] Jeon S., Kim H., Park T et al. (2011). "Development of polycarbonate/acrylonitrile–butadiene–styrene copolymer based composites with functional fillers for car audio chassis". *Materials & Design*, 32(3), pp 1306–1314.
- [15] Xu X. (2011). "Mechanical properties and deformation behaviors of acrylonitrile-butadiene-styrene under Izod impact test and uniaxial tension at various strain rates". *Polymer Engineering & Science*, 51(5), pp 902–907.
- [16] Tang J., Lee P. (2008). "Observations of physical aging in a polycarbonate and acrylonitrile-butadiene-styrene blend". *Journal of Applied Polymer Science*, 110(1), pp 97–108.
- [17] Lim J., Cho K., Park J. (2008). "Weld line characteristics of PC/ABS blend. II. Effect of reactive compatibilizer". *Journal of Applied Polymer Science*, 108(6), pp 3632–3643.
- [18] Srinivasababu N., Kumar K., Srikar G. (2015). " Mechanical Performance of Polycarbonate/ABS, Glass Filled Polycarbonate Blends – Review". *Applied Mechanics and Materials*, 766(767), pp 27–33.
- [19] Khan M., Liang R., Agarwal S. (2005). "Rheological and mechanical properties of ABS/PC blends". *Journal Korea Australia Rheology*. 17(1), pp 1-7.
- [20] Zhang X., Chen Y., Zhang Y et al. (2001). "Effects of ABS-g-MAH on mechanical properties and compatibility of ABS/PC alloy". *Journal of Applied Polymer Science*, 81(4), pp 831–836.

- [21] Tjong S and Meng Y. (2000). "Effect of reactive compatibilizers on the mechanical properties of polycarbonate/poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) blends". *European Polymer Journal*, 36(1), pp 123–129.
- [22] Wildes G., Harada T., Keskkula H et al. (1999). "Synthesis and characterization of an amine-functional SAN for the compatibilization of PC/ABS blends". *Polymer*, 40(11), pp 3069–3082.
- [23] Balakrishnan S., Neelakantan N., Saheb D et al. (1998). "Rheological and morphological behaviour of blends of polycarbonate with unmodified and maleic anhydride grafted ABS". *Polymer*, 39(23), pp 5765–5771.
- [24] Chaudhry B., Hage E., Pessan A et al. (1998). "Effects of processing conditions on the phase morphology of PC/ABS polymer blends". *Journal of Applied Polymer Science*, 67(9), pp 1605–1613.
- [25] Bertin M., Marin G., Montfort J. (1995). "Viscoelastic properties of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) polymers in the molten state". *Polymer Engineering and Science*, 35(17), pp 1394–1406.
- [26] Greco R., Astarita M., Dong L et al. (1994). "Polycarbonate/ABS blends : Processability, thermal properties, and mechanical and impact behavior". *Advances in Polymer Technology*, 13(4), pp 259–274.
- [27] Lombardo B., Keskkula H., Paul D. (1994). "Influence of ABS type on morphology and mechanical properties of PC/ABS blends". *Journal of Applied Polymer Science*, 54(11), pp 1697–1720.
- [28] Dong L., Greco R., Orsello G. (1993). "Polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene blends : 1. Complementary etching techniques for morphology observations". *Polymer*, 34(7), pp 1375–1382.
- [29] Lee M., Hiltner A., Baer E. (1992). "Formation and break-up of a bead-and-string structure during injection moulding of a polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene blend". *Polymer*, 33(4), pp 675–684.

Chapitre V : Etudes sur les mélanges PC /ABS

Ce chapitre a pour objectif d'analyser l'effet du compatibilisant SEBS-g-MAH sur les propriétés mécaniques, rhéologiques, et morphologiques du mélange PC/ABS.

En raison de la situation sanitaire que traverse l'Algérie suite à la pandémie du coronavirus-19, la partie expérimentale, est un travail existant dans la littérature.

Cette partie porte sur la présentation d'un travail récent de **DEBAH I et al. (2018)** sur l'effet du compatibilisant SEBS-g-MAH sur les propriétés mécanique, rhéologique, et morphologique du mélange PC/ABS.

V.1. Matériaux utilisés

- Le PC du bisphénol A, TARFLON_IV9000, a été fourni par Idemitsu Company (Japon).
- ABS, Magnum 3525, a été fourni par Trinseo (USA).
- Copolymère tribloc SEBS greffé avec 1,84% en poids MA, Kraton G 1901X, a été fourni par Kraton Polymer (USA) (poids moléculaire, 20 000 g / mol ; contenu en styrène, 28% en poids) [1].

V.2. Préparation du mélange de PC/ABS

Avant le mélange à l'état fondu, le PC et l'ABS ont été séchés sous vide pendant 4 h à 80°C et 12 h à 100°C, respectivement. Les mélanges de PC/ABS à diverses compositions (0, 20, 40, 50, 60, 80 et 100% en poids d'ABS) sans compatibilisant ont été désignés comme suit : ABS, PC20, PC40, PC50, PC60, PC80 et PC, respectivement. Les mêmes compositions, mais avec 1, 3 et 5% en poids compatibilisant (SEBS-g-MAH), avait la même désignation avec les terminaisons S1, S3 et S5, respectivement. Tous ces mélanges ont été préparés dans une extrudeuse double vis Co-rotative Collin ZK25 (Allemagne). Une température de fusion de 250°C et une rotation de la vis de 100 tr / min ont été utilisés. Les extrudats ont été refroidis dans un bain d'eau, puis granulés et séchés. Ensuite, le moulage par injection a été réalisé sur une machine de moulage par injection à vis alternative de type Battenfeld BA-230E (Autriche) pour obtenir des éprouvettes pour le test de traction (ASTM D638, type IV, épaisseur 1,84 mm) et le test d'impact (ASTM D256, épaisseur 3,1 mm) des polymères purs, ainsi que les mélanges (PC/ABS) non comptabilisés et comptabilisés. Les échantillons ont été laissés pendant 24 h dans un dessiccateur avant le test [1].

V.3. Observations morphologique

La microstructure a été observée par MEB à émission de champ MEB, Hitachi 2100 (Japon), fonctionnant à 15 kV. Les images des surfaces cryo-fracturées ont été directement obtenu sur le microscope électronique après un revêtement d'or [1].

V.4. Propriétés mécaniques

Les propriétés de traction (module de Young, résistance à la traction et l'allongement à la rupture) étaient mesurées à l'aide d'une machine Instron 4301 (USA) à une vitesse de traverse de 10 mm / min et 50 + 5% d'humidité relative. Un minimum de 5 éprouvettes de traction a été testées pour chaque valeur rapportée.

Les tests d'impact Izod entaillés ont été réalisés à 25°C sur des échantillons injectés (ASTM D256, épaisseur 3,1 mm) à l'aide d'un appareil Zwick (Allemagne). Les encoches (profondeur 2,54 mm et rayon 0,25 mm) ont été usinés après moulage par injection. Un minimum des 7 échantillons d'impact a été testés pour chaque valeur rapportée, et les résultats ont été moyennés [1].

V.5. Propriétés thermiques

Le comportement thermique des matériaux a été étudié par DSC en utilisant un instrument TA Q200 (USA) sous les conditions suivantes : plage de température, 25–200°C ; vitesse de chauffe, 10°C / min. Le test de l'ADM a été réalisé sur un appareil TA Instrument AMD Q800 qui fournit le tracé du module de perte E'' par rapport à la température. Les scans ont été effectués de 40°C à 200°C à une vitesse de chauffage constante de 4°C/min et à une fréquence de 1 Hz. L'ATG a été réalisée sur un instrument ATG-Q500 de 50°C à 800°C sous une atmosphère d'azote à une vitesse de chauffe de 10°C / min [1].

V.6. Propriétés rhéologiques

Les propriétés viscoélastiques dynamiques ont été réalisées avec un rhéomètre ARG2 (TA Instruments) en utilisant une géométrie à plaques-parallèles de 25 mm de diamètre. Les expériences en balayage fréquence dynamique ont été menées à l'état fondu à 250°C de 628 rad / s à 0,00628 rad / s dans la plage du régime linéaire viscoélastique [1].

V.7. Résultats et discussion**V.7.1. Morphologie**

La morphologie des mélanges de polymères non miscibles dépend des plusieurs facteurs y compris la composition, les conditions de transformation, la tension interfaciale et les propriétés rhéologiques des différents constituants. Un mélange non miscible entraîne généralement des morphologies grossières que celles de ceux compatibilisés [2].

Généralement, la morphologie est déterminée par la composition du mélange. Lorsqu'une phase est mineure, les gouttelettes sont dispersées dans la phase continue. Avec l'augmentation de la fraction volumique de la phase dispersée, il existe une zone de transition où les deux composants peuvent former une phase continue avec un haut degré d'interconnectivité associé à une amélioration des propriétés mécaniques, par rapport aux systèmes habituels de phase dispersée dans une autre continue [3,4]. Lee et al. ont étudié la morphologie d'un mélange PC/ABS sur toute la gamme de composition [5]. Les mélanges riches en PC ont montré l'ABS dans une structure de perles et de cordes avec l'augmentation du taux de l'ABS, et la transition vers une structure coalescée a été signalée entre les compositions 70/30 et 60/40. Dans le cas particulier de la composition 40/60, une inversion de phase a été détectée, où le PC a formé la phase dispersée avec des inclusions SAN.

La Figure.V.1 montre les micrographies SEM des mélanges PC/AB 80/20, 60/40 et 40/60, avec et sans 1% en poids de SEBS-g-MAH, respectivement. Les micrographies des mélanges non compatibilisés (Figures.V.1 (a) à (f)) montrent que la phase ABS se disperse sous forme de domaines avec une morphologie montrant une dispersion hétérogène quasiment sous forme de gouttelettes. L'ajout du compatibilisant a conduit à un changement clair de la taille et de la morphologie des domaines dispersés de l'ABS. La structure devient densément organisée et plus interconnectée et par conséquent peut être considérée comme une morphologie co-continue. L'effet est plus perceptible dans le cas de la composition PC/ABS 60/40. Ce résultat suggère que le SEBS-g-MAH améliore l'interaction entre PC et ABS, et induit un caractère de réseau à la morphologie continue. On s'attend à ce que la compatibilité améliore les propriétés mécaniques car chaque composant peut contribuer simultanément à supporter les sollicitations mécaniques.

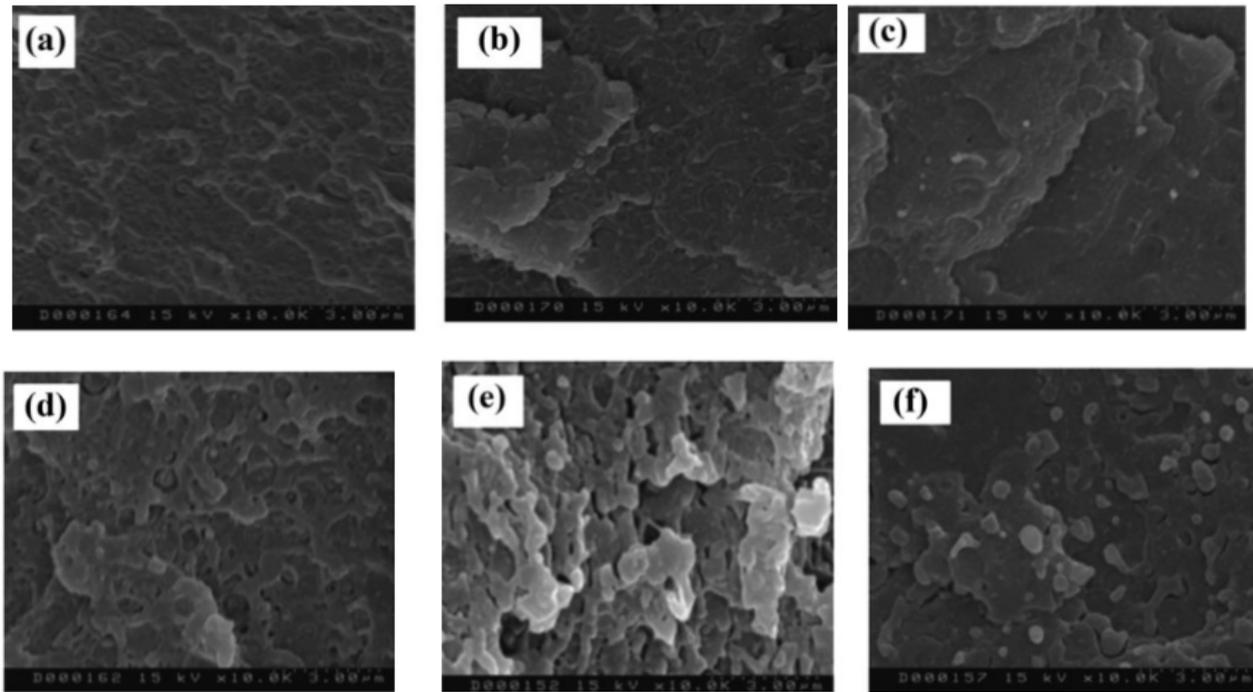


Figure.V.1. Micrographies MEB des mélanges : (a) PC80, (b) PC60, (c) PC40, (d) PC80S1, (e) PC60S1 et (f) PC40S1 [5].

V.7.2. Propriétés mécaniques

La détermination des propriétés mécaniques d'un matériau, y compris la résistance à la traction, l'allongement à la rupture et la résistance aux chocs est cruciale pour son utilisation dans des applications spécialisées [6]. Généralement, les propriétés mécaniques des mélanges non miscibles sans agents de compatibilité sont médiocres en raison de la faible adhérence interfaciale entre les composants. L'utilisation de compatibilisants pourraient améliorer leurs propriétés s'ils adhèrent bien aux deux composant non miscibles du mélange [7,8].

Les résultats de la résistance à la traction, le module de traction, l'allongement à la rupture et la résistance au choc des mélanges PC/ABS sont résumées dans le Tableau.V.1. On peut observer que les propriétés mécaniques du PC sont supérieures à celles de l'ABS. Il ressort clairement du Tableau.V.1., que l'ajout de l'ABS au PC entraîne une baisse des propriétés mécaniques, en particulier l'allongement à la rupture et la résistance au choc, car des valeurs inférieures à celles des polymères purs ont été enregistrées. Cette diminution a été attribuée au manque d'adhésion interfaciale entre les phases polymériques, ce qui a entraîné un faible transfert de contrainte entre la matrice et la phase dispersée et révèle l'incompatibilité du mélange PC/ABS [9]. Il a été rapporté dans la littérature que l'ajout de l'ABS abaisse la contrainte au seuil de l'écoulement, ainsi que la capacité d'étirage à froid de la matrice PC, et, par conséquent, l'allongement à la rupture du

mélange. Suarez [10] et Liu [11] ont rapporté que le mélange PC/ABS avec l'ABS comme phase majeure a une résistance au choc inférieure à celle de l'ABS pure.

Tableau V.1. Propriétés mécaniques des mélanges PC/ABS non compatibilisés.

PC/ABS	Module de traction (MPa)	Résistance à la traction(MPa)	Allongement à la rupture (%)	Résistance aux chocs (J/m)
100/0	2404 + 74	55 + 3	53 + 7	950 + 5
80/20	2491 + 48	52 + 4	56 + 6	688 + 30
60/40	2374 + 58	42 + 0.4	29 + 2	224 + 25
50/50	2367 + 40	39 + 1	13 + 7	62 + 5
40/60	2285 + 40	41 + 2	10 + 8	123 + 4
20/80	2278 + 45	37 + 0.8	4 + 0.6	120 + 12
0/100	2255 + 39	32 + 1	40 + 12	300 + 11

La Figure.V.2 (a) à (f) montre l'effet du rapport de mélange et de la teneur de l'agent compatibilisant sur les propriétés de traction des mélanges PC/ABS. Par rapport au mélange PC/ABS non compatibilisé, un effet clair de l'ajout du compatibilisant sur les propriétés de traction peut être observé sur la Figure.V.2 (a) : L'ajout de 1% en poids de SEBS-g-MAH aux mélanges PC/ABS produit une augmentation significative de la valeur de la résistance à la traction, en particulier lorsque la teneur en PC atteint 80% en poids. Une explication possible de l'augmentation de la résistance à la traction après l'ajout de SEBS-g-MAH est la promotion des interactions entre les phases du mélange. Cependant, cette amélioration est plus faible lorsque la teneur en SEBS-g-MAH est augmentée.

La Figure V.2 (b) montre le module de traction des mélanges PC/ABS en fonction à la fois de la teneur du PC et de celle du compatibilisant. Le PC pur a une valeur de 2404 MPa et celle de l'ABS pur est de 2255 MPa. Le module de traction des mélanges PC/ABS non compatibilisés augmente avec l'augmentation de la teneur en PC, avec un maximum lorsque le PC atteint 80% en poids. En général, le module est étroitement lié au domaine dur du matériau [12]. Cependant, lorsque le compatibilisant a été ajouté, les mélanges PC/ABS ont montré une amélioration de la rigidité, en particulier les mélanges contenant 1% en poids de SEBS-g-MAH. L'ajout de 3 et 5% en poids de compatibilisant a donné lieu à des valeurs inférieures de cette propriété, par rapport aux échantillons avec 1% en poids de SEBS-g-MAH. La diminution de la résistance à la traction et du module de Young avec l'ajout du SEBS-g-MAH dans des proportions supérieures à 1% en poids

pourrait être expliqué par le bas module de traction et la nature élastomère du SEBS-g-MAH [13,14,15].

La variation de l'allongement à la rupture en fonction à la fois de la teneur en PC et de l'agent compatibilisant est représentée sur la Figure V.2 (c). On peut observer que le mélange des deux composants fait chuter les allongements à la rupture à des valeurs inférieures à celles correspondant à l'ABS ou au PC. L'ajout du SEBS-g-MAH de 1 et 3% en poids a significativement amélioré l'allongement à la rupture. Farzadfar et al. [16] ont indiqué que l'allongement à la rupture des mélanges PC/ABS augmentait avec augmentation de la teneur en EVA-g-MAH, en raison des réactions chimique entre les groupes MAH de l'EVA-g-MAH et les groupes hydroxyles terminaux du PC [17]. De plus, l'anhydride maléique peut réagir avec le butadiène de l'ABS pendant le mélange à l'état fondu pour produire un copolymère bloc ou greffé, qui pourrait augmenter la résistance interfaciale [18,19]. Cependant, avec l'introduction du compatibilisant à 5% en poids, l'allongement à la rupture décroît à nouveau, en particulier à 80% en poids de PC. L'explication la plus probable est que lorsqu'il y a une grande quantité de comptabiliser, il se sépare de l'interface pour devenir une phase séparée, agissant comme un concentrateur de contraintes et par conséquent diminue l'allongement à la rupture [20].

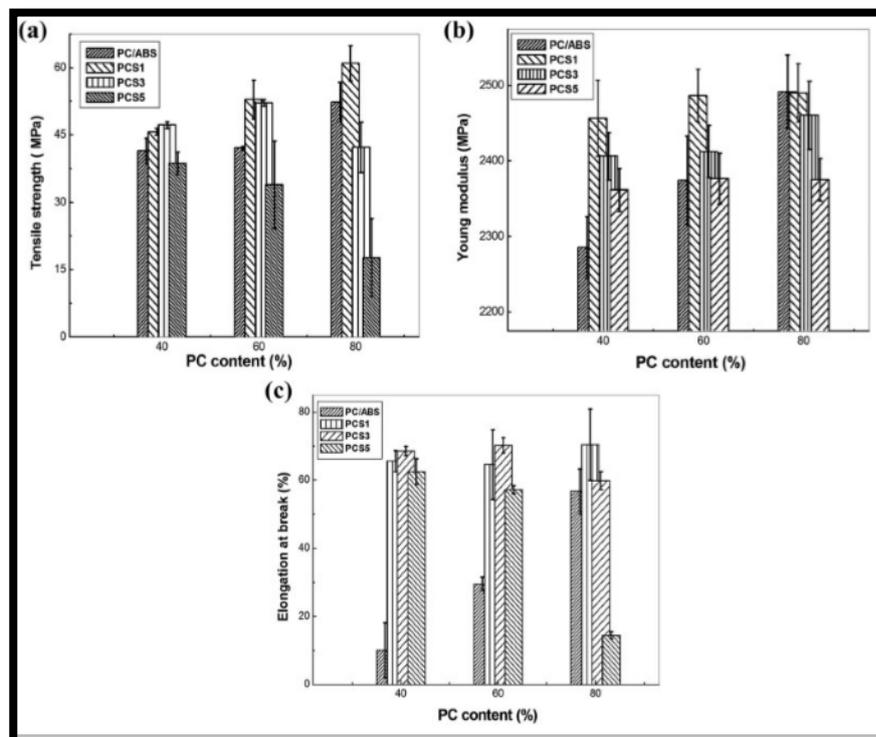


Figure V.2. Propriétés de traction des mélanges PC/ABS avec et sans le compatibilisant SEBS-g-MAH en fonction de la teneur en PC [16].

La résistance aux chocs Izod entaillée a été utilisée pour évaluer la ténacité. La résistance aux chocs d'un matériel décrit l'énergie nécessaire pour briser l'échantillon. La Figure.V.3 montre la résistance aux chocs Izod de certains mélanges PC/ABS avec et sans le compatibilisant pour différentes teneurs, la résistance aux chocs du PC étant supérieure à celle de l'ABS. Cependant, les mélanges sans compatibilisant ont montré des valeurs de résistance aux chocs inférieures à celles de l'ABS pur, sauf pour le mélange à 80% en poids de PC. Cela est dû à l'incompatibilité qui provoque une faible adhérence interfaciale entre les phases polymériques, conduisant ainsi à une résistance aux chocs plus faible des mélanges. Cependant, en ajoutant le SEBS-g-MAH, une augmentation remarquable de la résistance aux chocs a été observée. L'augmentation dans la valeur de la résistance aux chocs dans les échantillons comptabilisés pourrait être attribuée aux réactions chimiques entre les groupes MA du SEBS et les groupes hydroxyles du PC [21,22,23]. De cette façon, le compatibilisant peut réduire la tension superficielle et l'énergie d'interface, améliorant ainsi adhésion interfaciale. Cependant, comme mentionné ci-dessus, les résultats montrent que 1% en poids de SEBS-g-MAH est plus efficace pour améliorer la compatibilité que 3 ou 5% en poids. Cela implique que 5% en poids SEBS-g-MAH, comme mentionné ci-dessus, est un pourcentage excessif. Ramteke et al. [24] ont rapporté que la diminution de la résistance aux chocs à des teneurs en caoutchouc plus élevées peut être due à la formation de ligaments plus épais que l'épaisseur critique, ce qui provoque la coalescence du caoutchouc à des concentrations plus élevées, conduisant à la formation de grosses particules de caoutchouc.

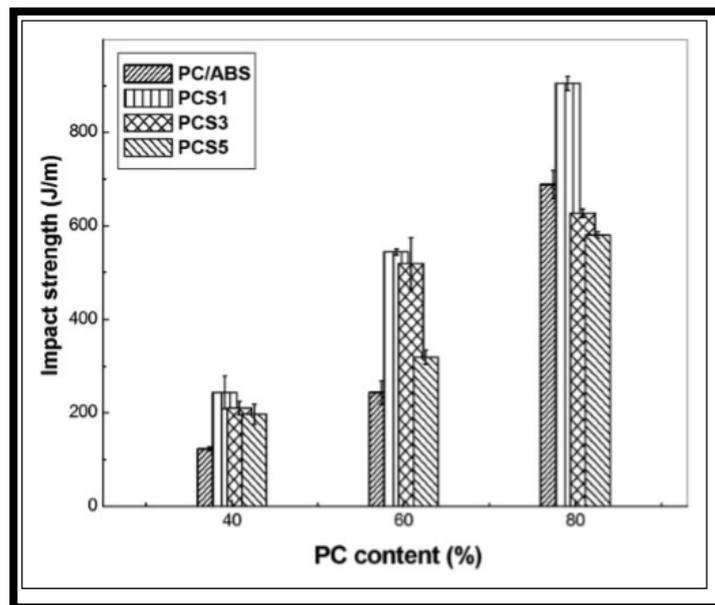


Figure V.3 : Résistance aux chocs Izod entaillée des mélanges PC/ABS avec et sans le comptabilisant SEBS-g-MAH en fonction de la teneur en PC.

V.7.3. Comportement de phase

La CDB et l'AMD sont des méthodes très pratiques pour déterminer la miscibilité et les propriétés thermiques des mélanges polymériques. Le comportement de la transition vitreuse du PC, de l'ABS et de leurs mélanges, avec et sans compatibilisant, à différentes concentrations a été étudié par CDB et AMD. Les résultats obtenus sur des échantillons avec 40, 60 et 80% en poids de PC sont résumés dans le Tableau.V.2. On peut voir que les valeurs Tg du PC et de l'ABS déterminées à partir de CDB étaient 147,3°C et 110,8°C, respectivement. De plus, toutes les compositions de mélange montrent deux Tg distinctes correspondant à des phases PC et ABS nettes, suggérant la nature non miscible du mélange. La même observation est obtenue à partir des résultats AMD, malgré que les valeurs de Tg déterminées par cette méthode étaient plus hautes. Cet écart peut être attribué à la réponse de nature différente de l'échantillon aux conditions d'analyse par CDB et AMD [25].

Tableau V.2. Températures de transition vitreuse Tg en (°C), du PC, de l'ABS, et des mélanges PC40, PC60 et PC80, avec et sans compatibilisant, tel qu'obtenu par CDB et AMD [25].

Composition	CDB			AMD		
	Tg, PC	Tg, ABS	ΔTg	Tg, PC	Tg, ABS	ΔTg
PC	147.3	/	/	152.7	/	/
ABS	/	110.8	36.0	/	114.9	37.7
PC40	143.4	110.9	32.4	139.5	114.6	24.8
PC40SI	150.5	112.3	38.1	147.0	115.5	31.5
PC40S3	146.3	110.5	35.7	149.8	116.9	32.8
PC40S5	145.6	110.6	34.9	149.0	115.4	33.5
PC60	141.8	112.4	29.4	145.0	116.9	28.0
PC60SI	147.7	113.8	33.9	150.4	119.0	31.4
PC60S3	147.9	113.9	34.0	150.8	119.3	31.4
PC60S5	145.9	112.3	33.6	149.8	117.6	32.1
PC80	144.4	113.2	33.6	149.2	118.8	30.4
PC80SI	147.6	115.6	32.0	151.1	121.2	29.9
PC80S3	147.9	112.7	35.2	151.0	120.7	30.2
PC80S5	148.6	113.1	35.5	151.1	120.8	30.2

Dans les mélanges compatibilisés, lorsque le SEBS-g-MAH a été ajouté, les deux Tg ont présenté un léger déplacement vers des températures plus élevées. En conséquence, l'ajout du compatibilisant conduit à une augmentation de la différence de Tg entre les deux phases. En général, la diminution de la différence des Tg des deux phases ($T_g, PC - T_g, ABS$) implique une compatibilité améliorée du mélange polymérique [26]. Par conséquent, le décalage de la transition vitreuse est opposé à la direction attendue. En fait, l'augmentation du décalage de la température indiquerait que le SEBS-g-MAH a eu un effet négatif sur la compatibilité du mélange PC/ABS. Cependant, l'analyse doit être considérée avec une certaine prudence car ce résultat est similaire à celui rapporté par Yin et al., [26] qui a constaté que la différence des Tgs des composants PC et SAN dans les mélanges PC/SAN/SEBS était plus importante que dans le mélange PC/SAN. Ces auteurs ont lié l'effet aux résultats de l'étude de la morphologie qui a révélé que le SEBS était non seulement distribué dans la phase SAN, mais aussi dans celle du PC. Cette distribution particulière pourrait être la raison pour laquelle la résistance aux chocs et l'allongement à la rupture du PC/SAN/SEBS étaient meilleurs que ceux du mélange PC/SAN/ABS.

V.7.4. Stabilité thermique du mélange PC/ABS

L'ATG a été réalisée pour estimer les effets du compatibilisant sur la stabilité thermique et le comportement de la décomposition thermique des mélanges PC/ABS. Les courbes ATG du PC, de l'ABS, et des mélanges PC/ABS avec et sans compatibilisant sont illustrés sur la Figure.V.4. Les valeurs des décompositions thermiques, y compris les températures de dégradation initiale, médiane et finale (T_i , $T_{50\%}$ et T_f , respectivement) et le résidu sont énumérées dans le Tableau.V.3.

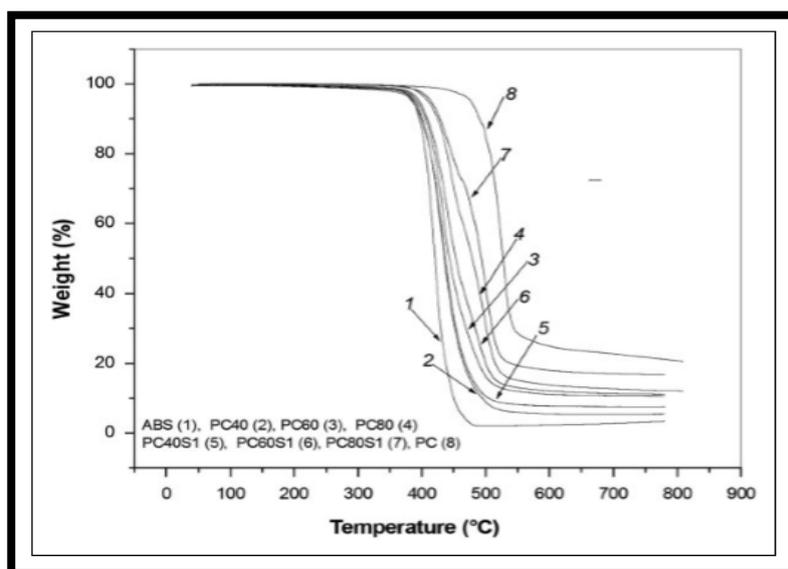


Figure.V.4. Courbes ATG du PC pur, de l'ABS et du PC/ABS avec et sans 1% en poids de compatibilisant.

Tableau.V.3 : Les données ATG du PC, de l'ABS et des mélanges PC/ABS avec et sans comptabilisant [1].

Paramètre	T _i (apparition) (°C)	T _{50%} (°C)	T _f (°C)	Résidu (%)
PC	470.2	526.8	541.3	20.7
PC40	406.9	485.1	520.0	8.4
PC40SI	410.0	493.4	527.8	16.8
PC40S3	409.8	491.5	520.9	15.2
PC40S5	408.7	448.6	495.7	13.8
PC60	392.2	443.1	501.7	10.6
PC60SI	395.6	452.9	511.2	11.2
PC60S3	388.8	459.0	510.6	11.6
PC60S5	390.9	433.7	467.3	9.0
PC80	392.4	435.4	481.1	5.5
PC80SI	388.2	436.9	483.2	7.7
PC80S3	392.4	434.7	470.3	6.8
PC80S5	388.8	430.7	460.2	6.8
ABS	389.5	420.5	456.9	3.9

La Figure.V.4 montre les courbes ATG du PC pur, de l'ABS et des mélanges PC/ABS avec et sans comptabilisant. Il est clair que la stabilité thermique du PC est supérieure à celle de l'ABS prouvée par la valeur de la température de dégradation inférieure de l'ABS par rapport à celle du PC. La décomposition du PC se produit en une seule étape qui s'étend de 470,2°C à 541,3°C avec un résidu solide de 20,7%. Cependant, la décomposition de l'ABS est effectuée en une seule étape qui commence à 389,5°C et se termine à 456,9°C avec un résidu solide de 3,9%. Comme le montre le Tableau.V.3 il semble que l'ajout d'ABS affecte la stabilité thermique du PC. Tous les mélanges PC/ABS présentent une stabilité intermédiaire, et les caractéristiques de dégradation diminuent avec l'augmentation de la quantité d'ABS. En conclusion, l'ajout de l'ABS au PC abaisse la stabilité thermique de ce dernier. Il y avait une apparente amélioration de la stabilité thermique par l'ajout du comptabilisant puisque la T_i et le T_f augmentent et atteignent un maximum à une teneur de 1% en poids de comptabilisant, mais qui diminue par à nouveau lorsque aux teneurs de 3 et 5% en poids. La même tendance a été constatée pour la masse résiduelle. L'effet inverse de l'ajout du comptabilisant, en fonction de son phr, est en accord avec le comportement observé des propriétés

mécaniques. Le résultat le plus remarquable de cette étude est que l'utilisation du compatibilisant à 1% en poids présente la meilleure stabilité thermique.

V.7.5. Propriétés rhéologiques

La mesure des propriétés rhéologiques est importante car elle fournit des informations sur l'effet de la compatibilisation, ainsi que les corrélations entre leurs propriétés rhéologiques-morphologiques-mécaniques [27]. Les variations de la viscosité complexe (η^*) en fonction de la fréquence angulaire du PC, de l'ABS et leurs mélanges PC40, PC60 et PC80, avec et sans 1% en poids de compatibilisant, sont représentés sur la Figure.V.5. On peut observer que la viscosité complexe de l'ABS était supérieure à celle du PC. De plus, on peut voir que le PC montre un plateau newtonien aux basses fréquences, contrairement à l'ABS. Pour les mélanges PC/ABS sans compatibilisant, la viscosité complexe diminue en augmentant la fréquence, montrant des valeurs inférieures à la fois au PC pur et à l'ABS. De plus, ces mélanges présentent un comportement de fluidification par cisaillement plus important. Le résultat montre également qu'une teneur élevée en ABS dans les mélanges conduit à des valeurs η^* plus élevées. De plus, par l'ajout de 1% en poids de SEBS-g-MAH, une augmentation dans la viscosité peut être observée, η^* prend des valeurs plus élevées que dans le cas des mélanges non compatibilisés. Cette augmentation de la viscosité complexe est cohérente avec les résultats des propriétés mécaniques. Ces faits peuvent suggérer que le SEBS-g-MAH se comporte comme un compatibilisant, au moins pour des teneurs jusqu'à 1% en poids. Par conséquent, les résultats de la viscosité complexe indiquent que l'effet de compatibilisation des mélanges non miscibles de PC/ABS grâce à l'ajout de copolymère séquencé SEBS-g-MAH modifie la morphologie et les propriétés mécaniques ainsi que le comportement viscoélastique des mélanges. Bien que l'importante relation morphologie-propriétés mécaniques ait été largement étudiée dans la littérature pour les mélanges compatibilisés, la corrélation entre les changements de morphologie et la rhéologie n'ont été étudiés en détails que récemment [3,28–29]. Il est actuellement admis que le compatibilisant immobilise partiellement les surfaces et rend les mélanges plus visqueux, augmentation de la viscosité complexe, en outre, elle rend le mélange plus élastique, car un module de stockage plus élevé et des temps de relaxation plus importants sont observés [30]. En tenant compte des résultats précédents, notre étude axée sur la compréhension des résultats viscoélastiques dynamiques, dans le but d'obtenir des informations sur la dynamique des changements morphologiques et les mécanismes de mélange de polymères et de séparation de phase produits lors de la compatibilisation. En fait, le comportement d'écoulement complexe des mélanges de polymères non miscibles reflète la dépendance entre la microstructure et les propriétés viscoélastiques. Pour les mélanges polymériques binaires, le composant mineur forme généralement

des gouttelettes sphériques dans une matrice du composant principal, qui constitue la phase continue. En augmentant la fraction volumique du composant mineur, il est possible que les gouttelettes dispersées finissent par percoler et forment un réseau continu, connu sous le nom de morphologie co-continue [30].

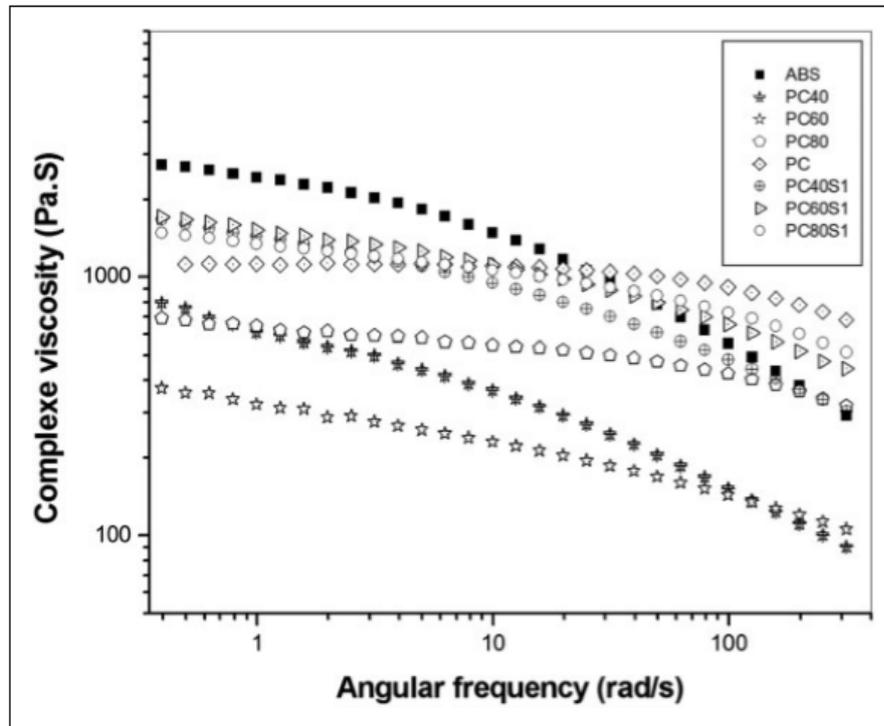


Figure V.5. Viscosité complexe (η^*) en fonction de la fréquence pour les composants purs, et les mélanges PC40, PC60 et PC80 avec et sans 1% en poids de comptabilisant à 250°C [30].

Référence bibliographiques

- [1] Debbah I., Krache R., Aranburu Net al. (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), pp 1-23
- [2] Borah JS., Chaki TK. (2010). "Propriétés rhéologiques, morphologiques et mécaniques dynamiques des mélanges LLDPE/EMA compatibles". *Journal de recherche sur les polymères*, 18 (5), pp 907-916.
- [3] Pötschke P., Paul DR. (2003"). " Formation de structures co-continues dans des mélanges de polymères non miscibles mélangés à l'état fondu. *Journal of Macromolecular Science, Part C : Polymer Reviews*, 43 (1), pp 87-141.
- [4] Inberg F., Caymans R.J. (2000). "Cocontinuous polycarbonate acrylonitrile–butadiene–styrene/ blends". *Polymer*,43, pp 2425–2434.
- [5] Lee M., Hiltner A., Baer E. (1992). "Morphologie de phase de mélanges de polycarbonate/acrylonitrile-butadiène-styrène moulés par injection". *Polymère*, 33(4), pp 685-697
- [6] Peydro MA., Parres F., Crespo JE., Navarro R. (2013). "Récupération de l'acrylonitrile-butadiène-styrène recyclé, par mélange avec du styrène-éthylène/butylène-styrène". *Journal de la technologie de traitement des matériaux*, 213 (8), pp 1268-1283.
- [7] Pang YX., Jia DM., Hu J., Hourston DJ et al. (2000). " Effets d'un agent compatibilisant sur la morphologie, l'interface et le comportement mécanique des mélanges polypropylène/poly (éthylène téréphtalate) ". *Polymère*, 41(1), pp 357-365.
- [8] Xanthos M., Young M., Biesenberger A. (1990). " Mélanges polypropylène/polyéthylène téréphtalate compatibilisés par fonctionnalisation ". *Ingénierie et science des polymères*, 30 (6), pp 355-365.
- [9] 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
- [10] Suarez H., Barlow JW., Paul DR. (1984). " Propriétés mécaniques des mélanges ABS/polycarbonate ". *Journal of Applied Polymer Science*, 29 (11), pp 3253-3259.

- [11] Liu X and Bertilsson H. (1999) ". Recyclage des mélanges ABS et ABS/PC ". Journal of Applied Polymer Science, 74(3), pp 510-515.
- [12] Jang C., Huh S., Jang J., Bae Y. (2001). " Propriétés mécaniques et morphologie du mélange réactif HDPE/amidon modifié ". Journal of Applied Polymer Science, 82 (13), pp 3313-3320.
- [13] Huang J., Keskkula H., Paul D. (2004). " Trempe caoutchouteuse d'un polyamide amorphe par des copolymères SEBS fonctionnalisés : morphologie et comportement aux chocs Izod ". Polymère, 45(12), pp 4203-4215.
- [14] Jazani OM., Arefazar A., Jafari SH et al. (2011). " Une étude sur les effets du SEBS-g-MAH sur la morphologie de phase et les propriétés mécaniques de mélanges de polymères ternaires polypropylène/polycarbonate/SEBS ". Journal of Applied Polymer Science, 121 (5), pp 2680-2687.
- [15] Gonzalez I., Eguiazabal J., Nazabal J. (2006). " Nanocomposites polyamide 6/argile caoutchouté ". Science et technologie des composites, 66 (11-12), pp 1833-1843.
- [16] Farzadfar A and Khorasani SN. (2012). " Effet de l'EVA-g-MAH sur les propriétés mécaniques des mélanges PC/ABS ". Technologie et ingénierie des polymères et des plastiques, 51 (14), pp 1424-1426.
- [17] Robeson L. (2007). " Polymer blends : a comprehensive review". Munich, Germany : Hanser Gardner Publication Inc.
- [18] Zhao G., Pan Z., Wang J., Guo Q et al. (2011). " Durcissement et compatibilité des mélanges acrylonitrile-butadiène-styrène/poly (éthylène téréphtalate) ". Journal of Macromolecular Science, Partie B, 50 (5), pp 821-830.
- [19] Farzadfar A., Khorasani SN., Khalili S. (2013). " Mélanges de polycarbonate recyclé et d'acrylonitrile-butadiène-styrène : comparaison de l'effet des agents de compatibilité réactifs sur les propriétés mécaniques et morphologiques ". Polymer International, 63(1), pp 145-150.
- [20] Zhao B., Wang Q., Hu G et al. (2012). " Effect of methyl methacrylate graft acrylonitrile-butadiene-styrene on morphology and properties of polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene blend. J Macromol Sci-B ,51, pp 2276–2283.

- [21] Balakrishnan S and Neelakantan R. (1998). " Propriétés mécaniques des mélanges de polycarbonate avec de l'ABS non modifié et greffé à l'anhydride maléique ". *Polymer International*, 45(4), pp 347-352
- [22] Tjong SC and Meng YZ. (2000). " Effet des agents de compatibilité réactifs sur les propriétés mécaniques des mélanges polycarbonate/poly(acrylonitrile-butadiène-styrène) ". *European Polymer Journal*, 36(1), pp 123-129.
- [23] Ramteke A and Maiti S. (2010). " Propriétés mécaniques du mélange de Terpolymères polycarbonate/acrylonitrile-styrène-acrylate modifié ". *Journal of Applied Polymer Science*, 116 (1), pp 486-492.
- [24] Benmesli S and Riahi F. (2014). " Propriétés mécaniques et thermiques dynamiques d'un mélange d'élastomère thermoplastique polypropylène/caoutchouc naturel chimiquement modifié ". *Test de polymère*, 36, pp 54-61.
- [25] Yin N., Zhang Y., Zhou. W. (2007). " Préparation et propriétés de l'alliage PC/SAN modifié avec un copolymère séquencé styrène-éthylène-butylène-styrène ". *Journal of Applied Polymer Science*, 106 (1), pp 637-643.
- [26] Xue M., Yu Y., Chuah H et al. (2007). " Miscibility and compatibilization of poly (trimethylene terephthalate) /acrylonitrile-butadiene-styrene blends ". *European Polymer Journal*
- [27] Vinckier I and Laun H. (1999). " Manifestation des processus de séparation de phases en cisaillement oscillatoire : systèmes gouttelettes-matrice versus morphologies co-continues ". *Rheological Acta*, 38(4), pp 274-286.
- [28] López-Barrón C and Macosko W. (2014). " Rhéologie des mélanges non miscibles compatibilisés à matrice de gouttelettes et morphologies Co continues lors du grossissement". *Journal de rhéologie*, 58 (6), pp 1935-1953.
- [29] Martin D and Velankar S. (2007). " Effets de l'agent de compatibilité sur les mélanges de polymères non miscibles à proximité de l'inversion de phase ". *Journal de rhéologie*, 51(4), pp 669-692.

Conclusions

Ce travail est placé résolument dans le contexte particulier du recyclage des DEEE. Ce dernier représente tout d'abord un enjeu environnemental majeur du fait de la croissance récente et spectaculaire de la quantité de ces déchets, croissance liée principalement à l'évolution rapide des équipements électroniques et électriques et à leur obsolescence rapide. Le recyclage des DEEE représente de plus un véritable défi technologique et scientifique, tant les difficultés à résoudre pour arriver à mettre en place une filière de valorisation économiquement viable sont nombreuses.

A partir des différents tests effectués nous pouvons conclure que :

Les essais ADMT ont montré que la présence et l'intensité d'un 3ème pic intermédiaire aux Tg des deux constituants PC et ABS, signature d'une structure lamellaire ou fibrillaire dans le mélange, était un bon indicateur du niveau de compatibilité entre les deux composants du mélange. Il est apparu que le fait d'ajouter de l'SEBS-g-MAH à nos mélanges entraînait une plus grande compatibilité des deux composants. Cette compatibilité accrue s'est avérée néfaste aux structures multicouches, dont les ruptures ont été plus nombreuses. Pour ces raisons, les structures compatibilisés ont présenté globalement de moins bons résultats pour les propriétés au choc que les mélanges non compatibilisés.

La morphologie et les propriétés mécaniques des mélanges PC/ABS a confirmé une augmentation de la résistance à la traction, l'allongement à la rupture et une diminution de la taille des domaines de la phase dispersée d'après l'ajout de 1% en points de compatibilisant SEBS-g-MAH.

Les résultats viscoélastiques dynamiques à l'état fondu révèlent la faisabilité de la méthode diagrammes de Cole et analysent des spectres de relaxation temporelle pour rechercher l'effet de compatibilisant sur la morphologie et la séparation de phases des mélanges. Il est démontré que cet outil rhéologique permet de distinguer morphologies de type émulsion et co-continues ainsi que pour analyser l'effet dû compatibilisant sur la tension interfaciale.

Ces résultats sont la preuve que le SEBS-g-MAH est bénéfique pour améliorer la compatibilité entre les phases PC et ABS lorsqu'ils sont ajoutés en quantités allant jusqu'à 1 % en poids. Enfin, il est aussi conclu que les quantités plus élevées de SEBS-g-MAH ne produisent pas d'améliorations supplémentaires aux propriétés du mélange, mais en fait peuvent même conduire à une perte de ces améliorations.

Résumé

L'objectif de ce travail est l'étude de l'effet du comptabilisant (SEBS-g-MAH) sur les différentes propriétés des mélanges (PC/ABS). À cette fin, des mélanges de PC et d'ABS à différentes compositions, sans comptabilisant et à des concentrations variables de compatibilisant, ont été préparés par mélange à l'état fondu dans une extrudeuse à double vis co-rotative suivie d'un moulage par injection. L'efficacité du comptabilisant a été étudiée en étudiant la microstructure et les propriétés mécaniques, thermiques et rhéologiques des mélanges. Il a été constaté que l'ajout de l'agent compatibilisant augmente 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. Cet effet a été noté à une charge de 1 % en poids de compatibilisant, où des interactions améliorées entre le PC et l'ABS peuvent être observées. Les méthodes rhéologiques, basées sur des tests viscoélastiques dynamiques, nous ont permis de distinguer les morphologies de type émulsion et co-continues et ont permis d'avoir un aperçu de l'effet du compatibilisant sur la tension interfaciale.

Mots clés : Mélange PC/ABS, compatibilisation, propriétés mécaniques, rhéologie, stabilité thermique

Abstract

In this research, the effect of maleic anhydride-grafted styrene-ethylene/butylene-styrene (SEBS-g-MAH) compatibilizer on different properties of polycarbonate and poly(acrylonitrile-butadiene-styrene) (PC/ABS) blends was investigated. For this purpose, blends of PC and ABS at different ratios, without and with varying concentrations of compatibilizer, were prepared by melt compounding in a co-rotating twin-screw extruder followed by injection molding. The effectiveness of the compatibilizer was investigated by studying the microstructure and the mechanical, thermal, and rheological properties of the blends. It was found that the addition of the compatibilizer increases tensile strength, modulus, elongation at break, impact strength, complex viscosity, and thermal stability. This effect was noted at a loading of 1 wt% of compatibilizer, where enhanced interactions between the PC and ABS can be seen. Rheological methods, based on dynamic viscoelastic tests, allowed us to distinguish between emulsion-like and cocontinuous morphologies and allowed an insight into the effect of the compatibilizer on the interfacial tension.

Key words: PC/ABS blending, compatibilization, mechanical properties, rheology, thermal stability.