

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



Faculté de Technologie
Département de Génie des procédés

Mémoire

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE Master

Domaine : Science et Technologie Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génies des Matériaux

Présenté par

ABDELFETTAH Nawal

BERBOUCHA Ouissem

Thème

Effet du mélange (PET/PEHD) recyclé, sur la résistance aux chocs du produit final.

Soutenue le 03 /07/2022

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mme N. CHIBANI	MCB	Université de Bejaia	Présidente
Mme N. ROUBA	MCB	Université de Bejaia	Examinatrice
Mr A. BELAMRI	MCB	Université de Bejaia	Encadreur

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciement

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier le Dieu tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de le terminer.

Nos remerciements les plus vifs et sincères vont à nos parents pour leurs soutiens permanent et surtout leur patience tout au long de ces années d'étude.

Nous adressons particulièrement nos vifs remerciements à notre promoteur Mr BELAMRI ABDELATIF de nous avoir offert un sujet aussi intéressant, à ses orientations et ses précieux conseils qui nous ont permis d'arriver à accomplir ce travail.

Nous exprimons toute notre gratitude et nos sincères remerciements à l'équipe de l'entreprise 'RIVAPLAST' particulièrement Mr FERKAN et le personnel de l'entreprise MAZIPLAST pour leur accueil.

Un grand merci à Mme GUESSOUM pour son aide et conseils et Mme BARADAI de laboratoire « GENIE DES PROCÉDES DE BEJAIA » .

Nos vifs remerciements vont aussi aux personnels du laboratoire des « HALL DES POLYMERS » à L'université de Sétif Ferhat Abbas-1 et aux personnels du « HALL MECANQUES » de l'Université de Bejaia

En fin nous adressons nos remerciements à tous membres de jury qui nous font le grand honneur en acceptant de juger ce travail, espérons qu'il soit digne de leurs intérêts.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les gens qui nous ont aidés de loin ou de près.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail accompagné d'un amour profond

*À Mon support dans ma vie, qui m'a appris, m'a encouragé et m'a dirigé vers la gloire
mon père je t'aime*

*À celle qui m'a arrosé de sa tendresse et de l'espoir, a la mère des sentiments sublimes qui
m'a bénie par ses prières, ma mère*

*Je vous dis simplement merci de m'avoir permis de devenir la personne que je suis
aujourd'hui je vous aime.*

À Mes chères sœurs : Nadia et Wahiba

À Mes chers frères : Djamal et Beskacem

À Mes chers beaux-frères : Hafite et Nacir

À Ma chère belle-sœur : Souhila

À Mes nièces : Lycia, Lyna, Amelia, hanane, Melina

À Mes neveux : Massil, Wassim, Lamine

À Mon cher amie : Mourad

À Mes copine : Amel, ouissem, warda, kenza, leïla

Et un grand merci à Mr Ferkan qui nous a aidé durant la réalisation de ce travail

Et à mon chien Ycuki

À ma copine et binôme : Ouissem au meilleur et au pire merci pour tous

Nawel

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail accompagné d'un amour profond

*À Mon support dans ma vie, qui m'a appris, m'a encouragé et m'a dirigé vers la Grâce ..
Mon père je t'aime*

*À celle qui m'a arrosé de la tendresse et de l'espoir, a la mère des sentiments sublimes Qui
m'a béni par ses prières ... ma mère je t'aime*

*Je vous dis simplement merci de m'avoir permis de devenir la personne que je suis
aujourd'hui je vous aime*

À Mes chères sœurs : Siham et Yasmîna

À Mon cher frère : Amar

À Mon cher beau-frère : Fares

À Mes neveux : Ouwais, Chaima et Abdou

Et aux chers Fahîma et Rabîaa et toutes les personnes qui m'ont aidée

*À ma meilleure Feriel, et mes chers copines : Fariza, Loulou, Amel, Ouarda, Wiwi,
Kenza, Warda, Kenza', Fussa.*

Et un grand merci à Mr Ferkan qui nous a aidés durant la réalisation de ce travail

Et toutes personnes qui m'ont encouragé durant toute cette période

À mon cher grand père tu me manque

À moi qui ai resté vivante jusqu'à ce jour merci

À ma copine et binôme Nawel au meilleur et au pire merci pour toujours

Ouissem .

Liste des abréviations

ADN : Acide Désoxyribonucléique

AT : Acide téréphtalate

EG : l'éthylène glycol

PET : Polyéthylène téréphtalate

TPA : Polyestérification directe de l'acide téréphtalique

BHET : Bis(2-Hydroxyethyl) Téréphtalate

DMT : Diméthyltryptamine

Tg : Température de transition vitreuse

Tc : Température de combustion

Tf : Température de fusion

PE : Polyéthylène

PEBD : Polyéthylène basse densité

PEBDI : Polyéthylène basse densité linéaire

PEBD_r : Polyéthylène basse densité ramifié

PEHD : Polyéthylène haute densité

PEMD : Polyéthylène moyenne densité

UV : Ultraviolet

DMA : Déchets Ménagers et Assimilés

PVC : Polychlorure de vinyle

PP : Polypropylène

PS : Polystyrène

PB : Polybutadiène

PVA : poly (alcool vinylique)

IF : Indice de Fluidité

IRTF : Infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)

PET_r : Polyéthylène téréphtalate recyclé

PEHD_r : Polyéthylène haute densité recyclé

(PET/PEHD)-R : Mélange Polyéthylène téréphtalate et Polyéthylène haute densité recyclé

Listes de figures

Chapitre I : Généralités sur les polymères et Recyclage

Figure I.1 : Modèle schématique de la synthèse d'un polymère	3
Figure I.2 : structure de chaines des polymères	4
Figure I.3 : Grandes étapes de la fabrication des plastiques	6
Figure I.4 : Structure de répétition du polyéthylène téréphtalate	7
Figure I.5 : Synthèse du polyéthylène téréphtalate	8
Figure I.6 : Principales transitions thermiques du PET	9
Figure I.7 : Variations de la viscosité newtonienne du PET provenant de bouteilles en fonction du nombre de cycles pour des paillettes séchées (1) et non séchées (2)	10
Figure I.8 : Conformations trans et gauche du groupement glycolique	11
Figure I.9 : Représentation de la structure cristalline du PET	12
Figure I.10 : Evolution de la production de la matière plastique de 2016 à 2020	16
Figure I.11 : composition des déchets plastiques en 2018 et 2019 en Algérie	16
Figure I.12 : Régénération du PEHD	19

Chapitre II : Mélanges de polymères

Figure II.1 : Types des morphologies possibles dans les mélanges polymériques	23
Figure II.2 : Evolution de la viscosité du PET et du PEhd en fonction du taux de cisaillement à 280°C (a) , Evolution du rapport des viscosités PET/PEhd en fonction du taux de cisaillement pour différentes températures (b)	24
Figure II.3 : Evolution de la viscosité d'un mélange PET/PEhd (80/20) en fonction du taux de cisaillement	25
Figure II.4 : Viscosité complexe d'un mélange PET/PEhd (80/20) vierges en fonction de la fréquence 280°C (a) , Viscosité complexe d'un mélange PET/PEhd (80/20) recyclés en fonction de la fréquence à 280°C (b)	25
Figure II.5 : Evolution de l'indice de fluidité à chaud d'un mélange PET/PEhd en fonction de la proportion de PET	26

Chapitre III : Matériaux et techniques expérimentales

Figure III.1 : Le PET recyclé (PETr) utilisé sous forme de paillette, à l'université de Bejaia	30
---	----

Figure III.2 : Le PEHD recyclé (PEHDr) utilisé sous forme de paillette, à l'université de Bejaia	31
Figure III.3 : Le PET recyclé (PETr) utilisé sous forme de paillette, fourni par l'entreprise Revaplast	31
Figure III.4 : Extrudeuse mono vise type Controlab, Au niveau de hall des polymères Sétif.....	33
Figure III.5 : Extrudeuse mono vise type Negri Bossi Cambio, au niveau de l'entreprise Maziplast Akbou.....	34
Figure III.6 : Pastilleuse manuelle type Shimadzu, au niveau du laboratoire génie des procédés à l'université de Bejaïa.....	35
Figure III.7 : Les pastilles préparés par compression dans une presse manuelle, mélange (PET/PEHD) -R, A (50% /50%) -R, B (70%/30%) -R, C (80% /20%) –R, D (90%/10%)-R, réalisés au laboratoire génie des procédés de Bejaïa	36
Figure III.8 : Presse hydraulique du type Carver, effectuer au sein du laboratoire Hall des Polymères à l'université de Ferhat Abbas-Sétif 1	37
Figure III.9 : Appareil de mesure de l'indice de fluidité (IF), réalisés au Hall des Polymères à l'université de Ferhat Abbas-Sétif 1	38
Figure III.10 : Appareils d'essai Charpy de type Ceast, réalisés au Hall technologie de l'université de Bejaia	39
Figure III.11 : La microscopie électronique de type PHYWE, réalisés au Hall technologie de l'université de Bejaia	39
Figure III.12 : Protocol expérimental à l'université	40
Figure III.13 : Protocol expérimental industriel	41

Chapitre IV : Résultats et discussions

Figure IV.1 : Spectre Infrarouge des mélanges (PET/ PEHD) -R à l'université	42
Figure IV.2 : Spectre Infrarouge des mélanges (PET/ PEHD) –R au niveau industriel	43
Figure IV.3 : variations de l'indice de fluidité (IF) du système (PET/PEHD) -R en	

fonction des taux de PETr.....	44
Figure IV.4 : variations de la résilience des mélanges (PET/PEHD) -R en fonction des taux de PEHDr.....	49
Figure IV.5 : la microphotographie des échantillons PETr (a) et PETrC (b).....	50
Figure IV.6 : Faciès de la fracture d'une éprouvette de mélange(100%PETr/0%PEHDr) après résilience.....	51
Figure IV.7 : la fracture d'une éprouvette du mélange (90%PETr/10%PEHDr).....	52
Figure IV.8 : la fracture d'une éprouvette du mélange (80%PETr/20%PEHDr)	52
Figure IV.9 : la fracture d'une éprouvette du mélange industriel (80%PETr/20%PEHDr) ...	53
Figure IV.10 : la fracture d'une éprouvette du mélange (70%PETr/30%PEHDr)	54
Figure IV.11 : la fracture d'une éprouvette de mélange industriel (70%PETr/30%PEHDr) ..	54
Figure IV.12 : la fracture d'une éprouvette de mélange (50%PETr/50%PEHDr)	55
Figure IV.13 : la fracture d'une éprouvette de mélange industriel (70% PETr/30% PEHDr)	55

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les polymères et Recyclage

Tableau I.1 : Propriétés mécaniques du PEHD	14
--	----

Chapitre II : Mélange de polymères

Tableau II.1 : Minimum requis pour la transformation à l'état fondu de paillettes de PET recyclé D'après F. AWAJA et al	27
--	----

Tableau II.2 : Températures de fusion des polymères (fiche technique).....	28
---	----

Chapitre III : Matériaux et techniques expérimentales

Tableau III.1 : Formulations des mélanges (PET/PEHD) –R réalisés au niveau de hall des polymères Sétif	33
---	----

Tableau III.2 : Formulations des mélanges PETrC/PEHDr, réalisés au niveau de l'entreprise Maziplast Akbou	35
--	----

Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableau IV.1 : Résultats de mesure de l'indice de fluidité	45
---	----

Tableau IV.2 : Les différents phénomènes de rupture des éprouvettes après l'essai de choc ...	46
--	----

Tableau IV.3 : Résultats d'essai de choc	48
---	----

Sommaire

Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction...	1

Chapitre I : Généralités sur les polymères

I.1 Définitions des polymères.....	3
I.2 Structure des polymères.....	3
I.2.1 Polymères linéaires.....	4
I.2.2 Polymères ramifiés.....	4
I.2.3 Polymères réticulés.....	4
I.3 Différentes classes de polymères.....	4
I.3.1 Classification selon l'origine.....	4
I.3.2 Selon leur nature chimique.....	5
I.3.3 Selon le comportement thermique.....	5
I.3.4 Selon l'importance économique.....	6
I.4 Fabrications et transformations des polymères.....	6
I.5 Polyéthylène téréphtalate.....	7
I.5.1 Présentation du PET.....	7
I.5.2 Propriétés de PET.....	8
I.5.2.1 Propriétés physique et chimique.....	8
I.5.2.2 Propriétés thermique.....	9
I.5.2.3 Propriétés thermomécaniques.....	9
I.5.2.4 Propriétés rhéologiques.....	10
I.5.3 Structure cristalline du polyéthylène téréphtalate.....	11
I.5.4 Domaines d'application du PET.....	12

I.6 Polyéthylènes	12
I.6.1 Définition	12
I.6.2 Différents types de polyéthylènes	13
I.6.3 Propriétés des polyéthylènes hautes densité.....	13
I.6.3.1 Propriétés physiques.....	13
I.6.3.2 Propriétés chimiques	13
I.6.3.3 Propriétés électriques.....	13
I.6.3.4 Propriétés thermiques.....	13
I.6.3.5 Propriétés mécaniques.....	14
I.6.4 Domaines d'applications de PEHD	14
I.6.5 Avantages et inconvénients de PEHD	15
I.7. Recyclage des polymères.....	15
I.7.1. Définition	15
I.7.2 Production mondiale de la matière plastique.....	15
I.7.3. Traitement des déchets plastiques.....	16
I.7.4. Sources des déchets plastiques.....	17
I.7.5. Différentes méthodes de valorisation des déchets plastiques	17
I.7.5.1. Valorisation énergétique	17
I.7.5.2. Valorisation chimique	17
I.7.5.3. Valorisation mécanique.....	17
I.7.6 Les contaminants avant recyclage du PET et leurs problèmes	18
I.7.7 Etapes de recyclage du PET	18
I.7.8 Etapes de recyclage du PEHD.....	18
I.7.9 Les avantages du recyclage.....	19

Chapitre II : Mélanges de polymères

II.1. Mélanges de polymères	20
II.1.1. Intérêts des mélanges de polymères	20
II.1.2. Types des mélanges de polymères.....	20

II.1.2.1. Mélange miscible.....	20
II.1.2.2. Mélange non miscible.....	20
II.1.2.3. Mélange compatible.....	21
II.2. Stratégie d'élaboration des mélanges polymériques.....	21
II.2.1. Mélange à l'état fondu.....	21
II.2.2. Mélange en solution.....	21
II.3. Thermodynamique des mélanges de polymères.....	21
II.4. Morphologies des mélanges.....	22
II.5. Présentation des mélanges PET/PEhd.....	23
II.5.1 Propriétés rhéologiques des mélanges PET/PEhd non-compatibilisés.....	24
II.5.2. Viscosité des polymères parents.....	24
II.5.4. Viscosité de mélanges de composition majoritaire en PEhd.....	25
II.5.5. Fluidité à chaud.....	26
II.6. PET bouteille à l'emballage alimentaire.....	27
II.6.1 Contraintes techniques.....	27

Chapitre III Matériaux et techniques expérimentales

III.1. Objectifs de l'étude.....	30
III.2. Matériaux.....	30
III.2.1 Matériaux utilisés à l'université.....	30
III.2.2 Matériaux utilisée au niveau de l'industrie.....	31
III.3. Techniques expérimentale.....	32
III.3.1. Préparation des échantillons en PETr.....	32
III.3.2. Préparation des échantillons en PEHDr.....	32
III.3.3 Cristallisation des paillettes en PETr utilisée au niveau de l'industrie.....	32
III.3.4 Préparation des mélanges (PET/PEHD) recyclés par extrudeuse.....	32
III.3.4.1 Extrudeuse utilisée à l'université.....	32

III.3.4.2 Extrudeuse au niveau industriel	34
III.4 Techniques expérimentales	35
III.4.1 Spectrophotométrie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)	35
III.4.2 Préparation des éprouvettes des essais mécaniques par compression	36
III.4.3 Mesure de l'indice de fluidité (IF).....	37
III.4.4 Essai de choc Charpy (Essai de Résilience).....	38
III.5 Microscopie électronique	39

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV .1 Résultats de l'analyse infrarouge	42
IV.1.1 Analyse infrarouge des mélanges (PET/PEHD) –R réalisé à l'université Sétif.....	42
IV.1.2 Analyse infrarouge des mélanges (PET/PEHD) -R réalisé à l'industrie.....	43
IV .2 Mesure de l'indice de fluidité (IF)	44
IV.3 Résultats de l'essai de choc	45
IV.4 Etude morphologique du système PETr, PETrC et de mélange (PET/PEHD) -R faites à l'Université et l'industrie.....	50
Conclusion générale	56
Bibliographie	57
Résumé	

Introduction

INTRODUCTION

Au cours de ces dernières années, l'Algérie investit fortement dans la production de matières premières plastiques afin de pouvoir réduire progressivement ces importations. La consommation et les importations de matières premières plastiques ont augmenté de 10% par an au cours des 14 dernières années, passant de 304 kt en 2007 à bien plus de mille kt pour une valeur de plus de 2 milliards de dollars US en 2021, faisant de l'Algérie le deuxième plus grand importateur de plastiques sous forme primaire en Afrique et au Moyen-Orient, après l'Égypte et devant le Nigeria, les Émirats arabes unis, l'Afrique du Sud, l'Arabie saoudite et l'Iran [1].

Cette forte croissance de la consommation, générant un flux de déchets très important, l'élimination de ces déchets par mise en décharge ou incinération n'est plus préconisée et laisse place à la collecte et à la revalorisation chimique ou mécanique. De nombreux efforts sont donc fournis pour trouver de nouveaux procédés capables d'assurer la rentabilité du recyclage.

L'objectif de cette étude est d'étudier le recyclage mécanique du polyéthylène téréphtalate (PETr), ce matériau est en effet l'une des matières plastiques les plus employées dans le secteur des emballages de produits alimentaires et spécialement dans les secteurs des eaux (minérales, de source...). Toutefois, en raison de sa faible viscosité nous avons décidé de l'utiliser en mélange avec un autre polymère, le polyéthylène haute densité (PEhdr) qui constitue un autre gisement important de déchets.

Nous avons donc étudié le mélange (PET/PeHD)-R à des proportions différentes, en nous fixant pour objectif de montrer que celui-ci et les paramètres qui le contrôlent pouvaient avoir une incidence déterminante sur la morphologie finale et donc sur les propriétés mécaniques des mélanges.

Pour cela, nous avons commencé par étudier leur résilience (résistance aux chocs), sur un mouton de Charpy. Puis par la suite étudier leur structure microscopie optique, sur un mouton de Charpy.

Nous avons essayé de trouver un lien direct entre les teneurs des mélanges, leur microstructure et leur comportement mécanique (résilience).

Après avoir étudié le mélange (PET/PEHD)-R à des proportions différentes, nous avons voulu évaluer l'intérêt industriel d'une telle étude. Pour cela, nous avons travaillé avec l'entreprise Akbou-plast spécialisée dans la fabrication d'emballage en plastique.

Le présent travail est structuré en quatre chapitres, le premier chapitre est consacré à une généralité sur les polymères et recyclage. Le second chapitre portera sur l'étude de façon théorique sur des mélanges de polymères. Dans le troisième chapitre comporte une description détaillée de l'étude expérimentale suivie et les techniques de caractérisation utilisées (IRTF, IF, ...etc). Dans le dernier chapitre, on présente l'interprétation des résultats expérimentaux.

Enfin, nous terminons notre étude par une conclusion générale et la proposition de quelques solutions.

Chapitre I

Généralités sur les polymères et recyclage

L'industrie plastique est parmi les plus importantes activités industrielles chimiques en termes de qualité et de diversité des secteurs d'application. Aujourd'hui, les matières plastiques occupent une partie importante de notre quotidien. Voiture, ordinateurs, biberons, téléphones, vêtements, accessoires, emballages ; aucun aspect de la société n'a été épargné par les plastiques. Ils sont aujourd'hui la troisième composante des sciences des matériaux avec les métaux et les céramiques.

I.1. Définitions des polymères

Un polymère est défini comme étant une molécule à très longue chaîne qu'on appelle macromolécule. Elle est formée par la répétition d'entités chimiques simples appelées monomères reliées par des liaisons covalentes [2]. Un monomère est un composé constitué de molécules simples pouvant réagir avec d'autres monomères pour donner un polymère [3].

L'assemblage de monomères pour obtenir un polymère est appelé polymérisation **Figure I.1**

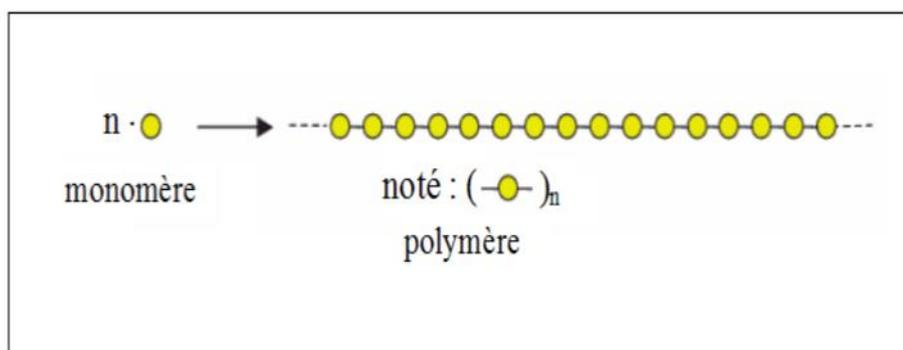


Figure I.1 : Modèle schématique de la synthèse d'un polymère [3].

La polymérisation de monomères pour obtenir des polymères est appelée polymérisation. La lettre n est appelée "degré d'agrégation" ou "indice d'agrégation" et pour des valeurs élevées de n ($n > 100$) on parle de macromolécules. Les polymères peuvent être caractérisés par leur degré de polymérisation ou leur poids moléculaire.

Les polymères peuvent être d'origine naturelle (animale ou végétale) ou synthétique. Des exemples de macromolécules naturelles sont le caoutchouc, les polysaccharides, le glycogène, l'ADN, les protéines, etc., les macromolécules synthétiques.

I.2. Structure des polymères

La soudure des groupes moléculaires du monomère peut donner naissance à trois types principaux de macromolécules :

- Polymères linéaires.

- Polymères ramifiés.
- Polymères réticulés [4].

I.2.1. Polymères linéaires

Un polymère linéaire est un polymère dans lequel les molécules sont constituées de plus ou moins longues chaînes d'atomes, cette chaîne est appelée chaîne principale. En général sur certains atomes de cette chaîne sont attachées de petites chaînes, ces petites chaînes sont appelées chaînes secondaires. Les chaînes secondaires sont beaucoup plus courtes que la chaîne principale, elles ont normalement quelques atomes, alors que la chaîne principale en a quelques centaines ou quelques milliers [5].

I.2.2. Polymères ramifiés

Est un polymère présentant au moins un point de ramification (branchement). Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur la chaîne au cours de la polymérisation. La chaîne branchée est dite greffon lorsque sa composition est différente de celle de la chaîne principale [5].

I.2.3. Polymères réticulés

La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques suivant les différentes directions de l'espace au cours d'une polymérisation, d'une polycondensation ou d'une polyaddition, et qui conduit à la formation d'un réseau [3].

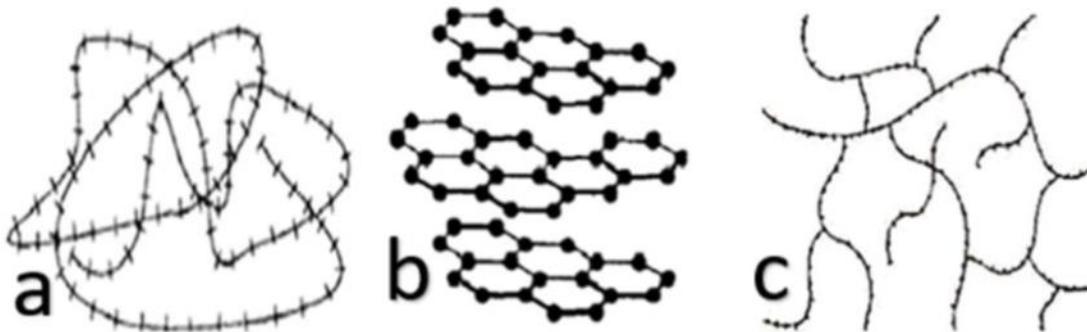


Figure I.2 : Structure de chaînes des polymères [2].

I.3. Différentes classes de polymères

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

I.3.1. Classification selon l'origine

Les polymères classés selon l'origine peuvent être :

- Polymères naturels : ce sont des composés organiques formant la matière vivante, comme les protéines, les acides nucléiques, la cellulose, la chitine...
- Polymères Artificiels : Polymères obtenus par modification chimique d'un polymère naturel, exemple : méthylcellulose.
- Polymères synthétiques : ce sont les matières plastiques, les élastomères, les fibres, les adhésifs [6].

I.3.2. Selon leur nature chimique

On distingue :

- Polymères minéraux : Ils sont constitués par des chaînes renfermant un seul corps simple comme le diamant, le graphite le phosphore et le soufre ou par des chaînes renfermant plusieurs hétéronomes comme les silicates, les acides poly phosphorique et les chlorures de poly-phosphonitriles .
- Polymères organiques : C'est la classe la plus riche, ils constituent presque la totalité des polymères d'utilisation courante. Les principaux polymères organiques de synthèses sont : polyoléfines, les polyvinyles, les polydiènes, les polyamides, les polyesters et les polyacryliques.
- Polymères mixtes : Ils sont doués de propriétés intéressantes ont une bonne résistance thermique (300-350C°). L'hétéroatome peut être soit dans la chaîne principale soit dans les motifs latéraux [7].

I.3.3. Selon le comportement thermique

Les polymères sont souvent classés d'après leurs propriétés thermodynamiques en trois types :

- **Thermoplastiques** : Ramollissent sous l'effet de la chaleur, il devient souple, malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables. Leurs polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaires reliées par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes [7].
- **Thermodurcissables** : Les matières thermodurcissables sont les produits dont la transformation conduit, par une réaction chimique, à des composés macromoléculaires tridimensionnels qui sont des matières thermo durcies ou thermo rigides. Dans ce cas les chaînes sont nombreuses, plus courtes et plus réactives, ces chaînes vont se lier ensemble chimiquement, cette réaction conduit à des liens chimiques rigides et met en jeu toutes les molécules présentes pour former un réseau tridimensionnel [7].

- **Élastomères** : Ils sont obtenus à partir de polymères linéaires par une réticulation (ou vulcanisation), dont la densité est beaucoup plus faible que dans le cas des polymères thermodurcissables, ce qui conduit à la formation d'une structure partiellement tridimensionnelle [7].

I.3.4. Selon l'importance économique

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

- Polymères de grande diffusion : Dont le volume des ventes et de production est élevé et dont le prix est faible comme : PP, PS, PVC.
- Polymères à hautes performances : Dont le volume des ventes est le plus faible et les prix les plus élevés comme : SBS, EVA
- Polymères techniques : Dont le volume et le prix sont intermédiaires entre les deux catégories précédentes, comme : polyamides, Polyéthylène [6].

I.4. Fabrications et transformations des polymères

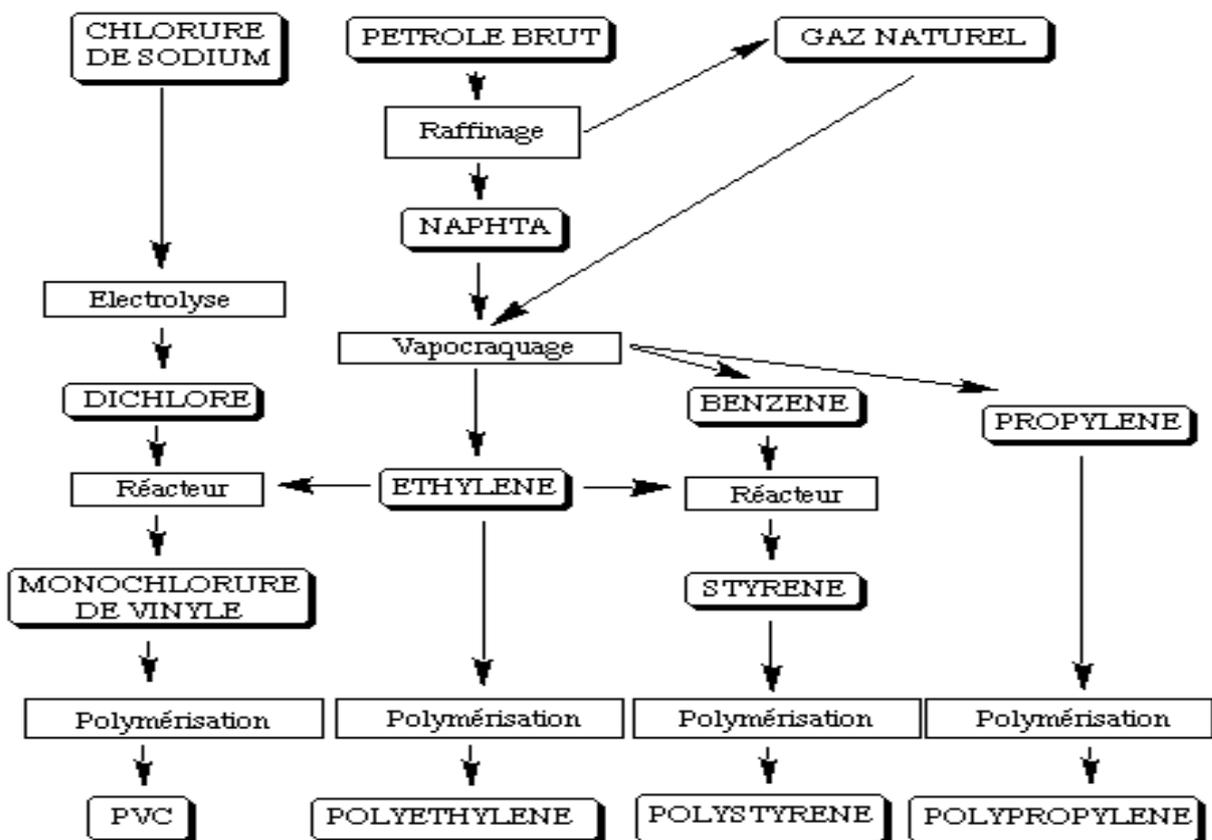


Figure I.3: Grandes étapes de la fabrication des plastiques [8].

A partir de naphta, le producteur de plastiques prépare par vapocraquage (ou reformage) les grands intermédiaires de la pétrochimie, dont les monomères qui, sous l'effet de pression, température, catalyseurs deviendront des polymères (polycondensats), qui constituent les matières plastiques proprement dites, que l'on utilisera dans la transformation.

Le passage du monomère au polymère (combinaisons de monomères) se fait de trois façons :

- Polymérisation
- Polycondensation
- Polyaddition. [8]

I.5. Polyéthylène téréphtalate

I.5.1. Présentation du PET

Le PET **Figure I.4** est un polymère de grande diffusion utilisé dans de nombreuses applications. Il est obtenu par estérification lente entre l'acide téréphtalate (AT) et de l'éthylène glycol (EG), c'est un matériau dur, rigide et solide avec une bonne stabilité dimensionnelle et un faible taux d'absorption d'eau. Il présente une bonne imperméabilité des gaz ce qui explique son utilisation pour les boissons gazeuses, il peut être transparent comme il peut être colore. Ce matériau peut être recyclé à l'aide pratiquement de toutes les techniques disponibles, du recyclage mécanique au recyclage chimique.

Le polyéthylène téréphtalate (PET) est un polycondensat de la famille des polyesters aromatiques. Sa formule chimique développée se présente sous la forme décrite sur la **Figure I.4**

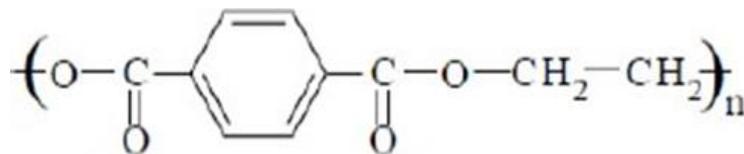


Figure I.4 : Structure de répétition du polyéthylène téréphtalate [9].

Le polyéthylène téréphtalate est synthétisé en trois étapes :

- **Polyestérification directe de l'acide téréphtalique (TPA)** : La première étape (a) de la **Figure I.5** consiste en une polyestérification directe de l'acide téréphtalique (TPA) avec de l'éthylène glycol. Cette réaction s'effectue à des températures voisines de 250°C sous pression atmosphérique pour former alors le bis hydroxyléthyl téréphtalate (BHET). Cette voie est la voie de synthèse la plus utilisée. D'autres voies de synthèse du BHET existent. Ainsi, une voie plus ancienne consiste en la transestérification du téréphtalate de diméthyle

(DMT) sur l'éthylène glycol. Le catalyseur de la réaction est alors dans la plupart des cas l'acétate de manganèse.

- **Polycondensation des extrémités de chaînes du BHET :** Lors de la deuxième étape (b) de la **Figure I.5**, qui vont réagir entre elles pour former les chaînes en PET, est réalisée. Cette réaction se déroule à des températures de l'ordre de 280°C en présence de catalyseurs tel que des systèmes à base d'Antimoine (Sb_2O_3) ou de Titane-Manganèse). Comme le montre la **Figure I.5**, la polycondensation amène à la formation d'éthylène glycol qu'il faudra donc retirer en continu.

Le PET ainsi produit durant cette synthèse possède une masse molaire, relativement faible, autour de 20000 $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ en nombre avec une viscosité intrinsèque de (0,6-0,65) $\text{dl}\cdot\text{g}^{-1}$. Il est récupéré sous sa forme amorphe. Afin d'obtenir une masse molaire plus élevée, il faut réaliser une post-polymérisation en phase solide.

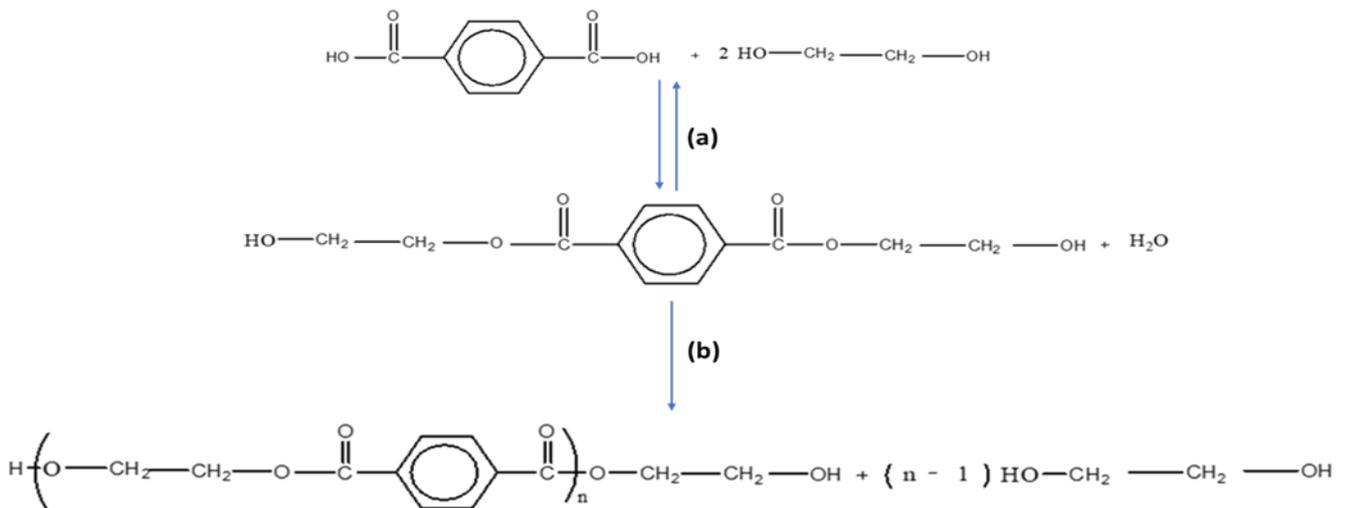


Figure I.5 : Synthèse du polyéthylène téréphtalate [10].

- **La post-polymérisation en phase solide a pour but de cristalliser le PET :** Celle-ci va permettre de maintenir les granulés pendant une vingtaine d'heures à des températures de l'ordre de 210-220°C sous vide (température de post-condensation). La masse molaire du PET augmente et s'organise pour atteindre des taux de cristallinité de l'ordre de 50 à 60%. La viscosité intrinsèque est alors de (0,7-0,8) $\text{dl}\cdot\text{g}^{-1}$. Le PET est alors prêt à être transformé par injection ou extrusion [10,11].

I.5.2. Propriétés de PET

I.5.2.1. Propriété physique et chimique

Le PET est un matériau dur présentant une bonne stabilité dimensionnelle. Il présente de bonnes propriétés barrières aux gaz (O_2 et CO_2), dont les diffusivités sont très faibles.

Le PET possède une excellente résistance chimique aux acides concentrés et dilués, aux alcools, aux cétones, aux graisses et aux huiles, mais s'hydrolyse en présence de produits alcalins. Il présente une bonne résistance aux ultraviolets et une exceptionnelle transmission ; son indice de réfraction se trouve dans l'intervalle (1,58-1,64) [12,13].

I.5.2.2. Propriété thermique

Le PET peut se trouver sous la forme amorphe ou semi-cristalline. Sa densité varie de 1,30 à 1,40. L'analyse thermique du PET permet de montrer la présence de trois transitions principales, comme l'indique-la **Figure I.6**. La première est la transition vitreuse. Elle est réversible et correspond à une variation de la mobilité moléculaire des chaînes de la phase amorphe. En dessous de la température de transition vitreuse (T_g), située généralement vers 80°C, le polymère est figé par des interactions physiques fortes. Au-dessus, la mobilité moléculaire augmente (phénomène endothermique) et il devient caoutchoutique ; ses propriétés élastiques augmentent et il devient moins rigide. Cette seconde transition apparaît vers 145°C et correspond à une recristallisation du PET amorphe dont le maximum du pic de cristallisation correspond à la température de cristallisation (T_c). Cette transition exothermique apparaît pour des matrices dont le taux de cristallinité initial est relativement faible et disparaît progressivement lorsqu'il augmente. Enfin, la troisième transition est endothermique et se situe vers (260-270)°C. Elle correspond à la fusion des cristallites à la température de fusion (T_f) du PET [13].

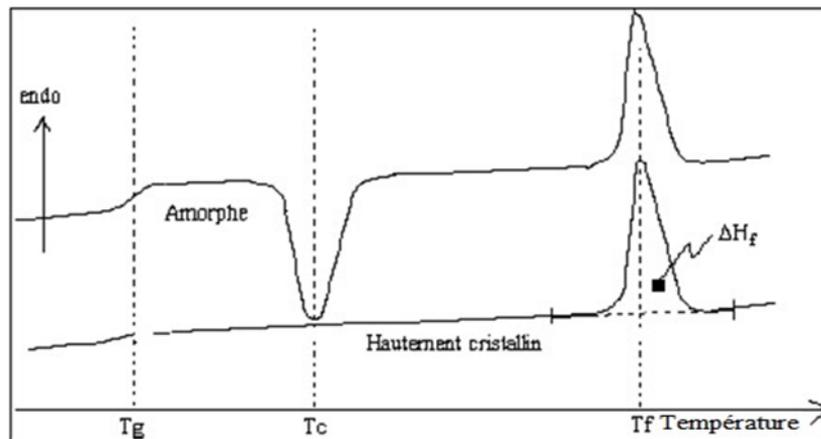


Figure I.6 : Principales transitions thermiques du PET [13].

I.5.2.3. Propriétés thermomécaniques

Le PET est principalement utilisé à la température ambiante. Il se présente dans un état vitreux et apparaît comme un matériau rigide. A la température de transition vitreuse, ses propriétés mécaniques chutent de façon importante. Au-dessus de T_g , la mobilité plus importante des chaînes permet, par exemple, l'étirage et l'orientation du polymère par soufflage

lorsqu'il est amorphe. La cristallisation et l'orientation du PET au-dessus et au-dessous de T_g augmentent ses propriétés mécaniques. Lorsque le PET est amorphe, son module mécanique augmente vers 145°C , conséquence de la recristallisation pendant le chauffage [13,14].

I.5.2.4. Propriétés rhéologiques

Le PET subit une diminution de masse moléculaire quand il est recyclé dans un système ordinaire d'extrusion. Au cours de sa transformation, les dégradations thermique et hydrolytique produisent de courtes chaînes ayant des groupements carboxyle et hydroxyle terminaux, des oligomères et des composés volatils qui catalysent la chute de la viscosité. La viscosité du PET dépend également du nombre de cycles d'injection successifs. Des études ont montré que la proportion de fin de chaînes carboxyliques augmente avec le nombre des cycles d'injection et qu'en même temps, l'indice de viscosité augmente également, traduisant une baisse de la viscosité. Ce phénomène est d'autant plus important que le PET ré-extrudé n'est pas séché avant l'extrusion [15], comme le montre la **Figure I.7**.

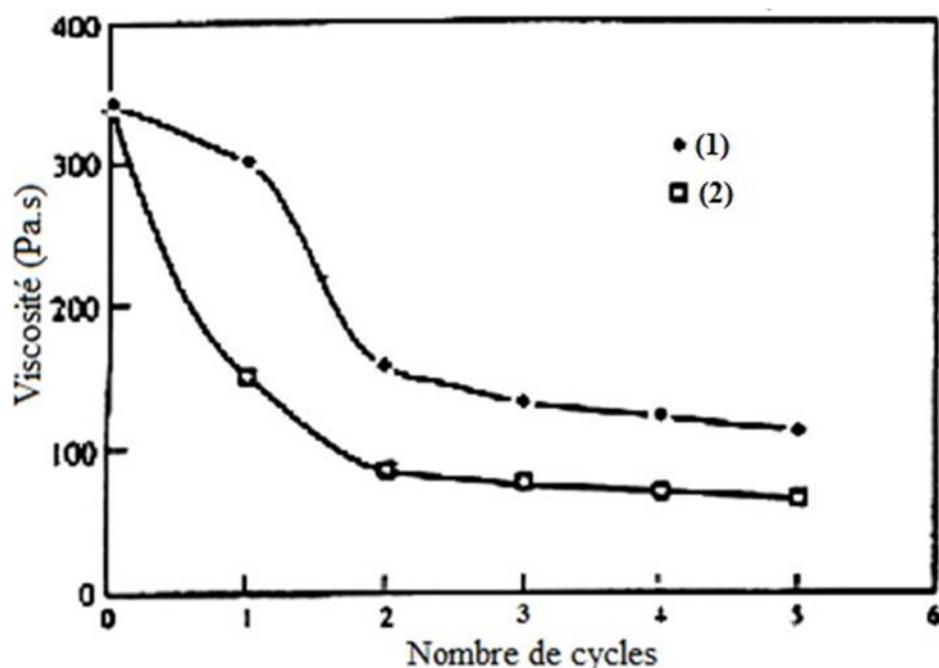


Figure I.7 : Variations de la viscosité newtonienne du PET provenant de bouteilles en fonction du nombre de cycles pour des paillettes séchées (1) et non séchées (2) [15].

La mise en œuvre du PET se fait généralement à des températures supérieures à 250°C . A ces températures, les dégradations thermique et hydrolytique du PET peuvent affecter de façon très importante et irréversible ses propriétés rhéologiques. Ce phénomène est fortement dépendant des conditions de mise en œuvre dans lesquelles la fusion a lieu. Durant la mise en œuvre, des précautions peuvent être prises pour limiter cette dégradation comme la réduction

des temps de séjour à l'état fondu et l'utilisation d'une atmosphère modifiée pour éviter toute oxydation [13].

I.5.3. Structure cristalline du polyéthylène téréphtalate

Le PET est un polymère qui peut être obtenu sous deux structures différentes :

- Une structure complètement amorphe lorsque le PET subit un refroidissement brutal de l'état fondu à l'état solide,
- Une structure semi-cristalline lorsque le PET est refroidi lentement, le taux de cristallinité maximum atteignant alors 50 % à 60 %.

Dans la phase amorphe, deux conformations de chaînes sont possibles. Elles peuvent être détectées par des mesures de spectroscopie infrarouge :

- Une conformation trans (1340 cm^{-1} dans la zone d'absorbance).
- Une conformation gauche (1370 cm^{-1} dans la zone d'absorbance).

Dans la phase cristalline, la minimisation de l'énergie potentielle impose une seule conformation possible : la conformation trans [16].

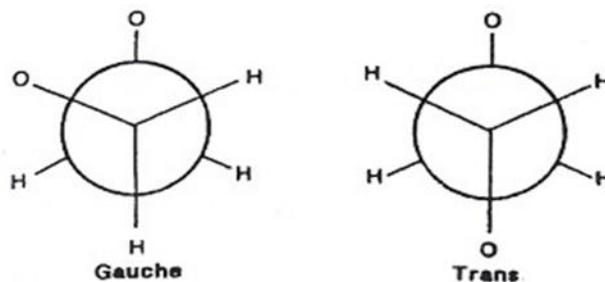


Figure I.8 : Conformations trans et gauche du groupement glycolique [16].

Enfin, de récents travaux proposent l'existence d'une phase mésomorphe constituée de conformères trans.

Dès les années 50, les paramètres de la maille cristalline du PET ont été déterminés par Daubeny et Al... Ainsi la structure cristalline s'organise selon une maille triclinique définie par : $a = 0.456\text{ nm}$, $b = 0.594\text{ nm}$, $c = 1.075\text{ nm}$, $\alpha = 98.5^\circ$, $\beta = 118^\circ$, $\gamma = 112^\circ$.

Chaîne macromoléculaire s'oriente parallèlement à l'axe c, **Figure I.9**.

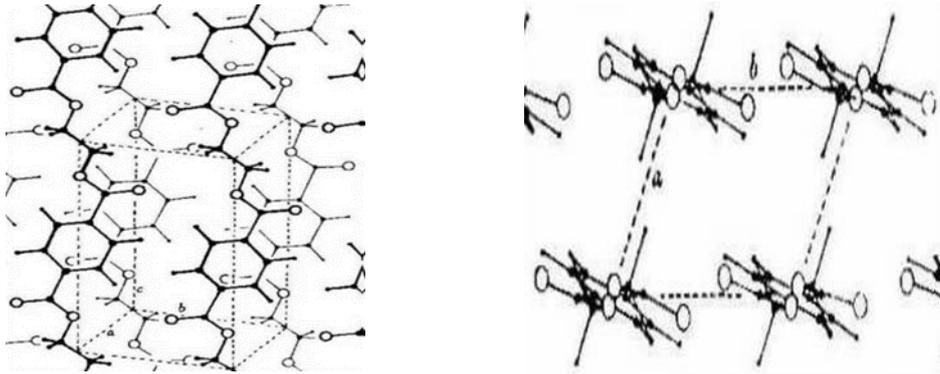


Figure I.9 : Représentation de la structure cristalline du PET [16].

I.5.4. Domaines d'application du PET

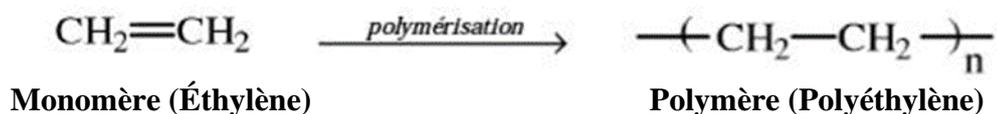
Les applications du PET sont très nombreuses mais l'application principale (60%) reste la production de fibres synthétiques pour la réalisation de tissus en association avec d'autres types de fibres comme du coton ou de la laine et en mélange avec de nombreux additifs pour modifier les propriétés des fibres et notamment leur couleur. D'autres applications sont très dominantes dans les industries comme :

- ✓ L'emballage alimentaire,
- ✓ Les bouteilles multicouches pour des applications alimentaires,
- ✓ Les fibres longues destinées au textile,
- ✓ Des feuilles et des plaques destinées au thermoformage,
- ✓ Des pièces destinées au secteur de l'électronique et de l'électroménager [17]

I.6. Polyéthylènes

I.6.1. Définition

Le polyéthylène est un matériau thermoplastique de la famille de polyoléfinés contenant uniquement des carbones hybridés de types sp^3 . Sa molécule se présente sous forme de chaînes contenant 1000 à 2000 monomères [18]. La formule chimique du polyéthylène est [19] :



Partiellement cristallin, le polyéthylène contient deux phases :

- Une zone amorphe dans laquelle les chaînes sont disposées de manière désordonnée.
- Une zone cristalline dans laquelle les chaînes sont disposées de manière ordonnée, formant ainsi des cristallites. Les chaînes dans les zones cristallines se regroupent sous

forme de lamelles (fibrilles lamellaires) de quelques centaines d'Angströms. Ces lamelles sont typiquement arrangées comme des sphérolites. [20,21].

I.6.2. Différents types de polyéthylènes

Les PE (polyéthylène) font partie des thermoplastiques, c'est-à-dire qu'ils ont des propriétés qui leur confèrent une malléabilité à chaud et une thermoplasticité réversible. Mais ils sont de natures différentes selon les modes de polymérisation :

- A partir d'un procédé à haute pression, on obtient un polymère très ramifié appelé le polyéthylène basse densité PEHD (il contient deux types principaux : le polyéthylène basse densité linéaire PEBDl et polyéthylène basse densité ramifié PEBDr).
- A l'inverse on utilise un procédé à basse pression pour obtenir le polyéthylène haute densité PEHD.

Il existe par ailleurs un autre type de PE, le PEMD (moyenne densité) ; mais c'est en réalité un intermédiaire entre des deux formes et n'a pas de caractéristique particulière ou intéressante qui mérite d'être développée [22].

I.6.3. Propriétés des polyéthylènes hautes densité

I.6.3.1. Propriétés physiques

La différence entre le PEHD et le PEBD est le point de ramollissement, puisqu'il se situe au-dessus du point d'ébullition de l'eau pour l'un et au-dessous pour l'autre. Les articles fabriqués, avec le polyéthylène de haute densité, peuvent ainsi être stérilisés à la vapeur.

I.6.3.2. Propriétés chimiques

Le polyéthylène possède une très bonne stabilité chimique [23] :

- Inattaquable par les acides (sauf les oxydants), par les solutions de sels
- Résistants aux solvants organiques au-dessus de 80°C
- Pratiquement insoluble, à des températures inférieures à 60 °C
- Sensible à la fissuration sous contrainte en présence de savon, alcools, détergents
- Il refroidi lentement et plus cristallin et moins perméable aux solvants.

I.6.3.3. Propriétés électriques

Le PE présente d'excellentes propriétés d'isolation électrique quelles que soient sa masse moléculaire et sa cristallinité. Sa faible permittivité relative et son faible facteur de dissipation diélectrique font de lui un matériau de choix en isolation électronique [23].

I.6.3.4. Propriétés thermiques

En l'absence de contrainte, le polyéthylène haut densité peut supporter une température de 110 à 120°C (stérilisation par exemple). Ce comportement est caractérisé par la température

de ramollissement Vicat (1kg) ou par la température de fléchissement sous charge qui augmente avec le taux de cristallinité ou le niveau de réticulation [23].

I.6.3.5. Propriétés mécaniques

A 23°C, les matériaux semi-cristallins sont au-dessus de leur température de transition vitreuse (environ – 120°C) ; leur phase amorphe est caoutchouteuse, ce qui affecte leurs propriétés mécaniques.

Tableau I.1 : Propriétés mécaniques du PEHD [22].

Propriétés	Unités	PEHD
Masse volumique	g/cm ³	0,945 – 0,970
Contrainte au seuil d'écoulement (traction)	MPa	26 – 34
Contrainte à la rupture	MPa	26 – 40
Allongement rupture	%	20 – 1 000
Module d'élasticité (traction)	MPa	800 – 1 300
Dureté de shore D	/	63 -67

I.6.4. Domaines d'applications de PEHD

Le PEHD doit répondre à plusieurs applications aux usages très variés et qui sont :

- **Film**

- La sacherie ;
- L'industrie : les emballages, films pour la construction ;
- L'hygiène : couches-bébés ;
- L'agriculture : serres, tunnels...

- **Objets moulés** : Dans le domaine des objets moulés, le polyéthylène haute densité s'est développé dans le secteur industriel : manutention, eaux, bouchonnage, et dans les applications techniques telles que le mobilier urbain.
- **Extrusion-soufflage** : Le domaine de l'extrusion-soufflage est réservé principalement au polyéthylène haute densité pour fabriquer des : bouteilles, flacons, bidon de lait, récipients pour lessive, détergents...
- **Tuyaux** : Dans l'application des tuyaux, le polyéthylène haute densité est employé pour la réalisation de tuyauteries de gaz, et pour les tuyaux sous pression, eau chaude, chauffage par le sol [24].

I.6.5. Avantages et inconvénients de PEHD

➤ Avantages [23]

- Mise en œuvre aisée.
- Excellentes propriétés d'isolation électrique.
- Résistance aux chocs.
- Grande inertie chimique.
- Qualité alimentaire
- Perte du caractère perméable des PE que ce soit à l'eau, mais aussi à l'air et aux hydrocarbures.
- Sensibilité aux UV en présence d'oxygène.
- Sensibilité à la fissure sous contrainte.
- Mauvaise tenue à la chaleur.
- Collage important.

➤ Inconvénients [23]

- Sensibilité aux UV en présence d'oxygène.
- Sensibilité à la fissure sous contrainte.
- Mauvaise tenue à la chaleur.
- Collage important.

I.7. Recyclage des polymères

I.7.1. Définition

Le recyclage est le fait de réintroduire un déchet dans un circuit de production d'énergie, d'une nouvelle matière, d'un nouvel objet, mais également, de toute opération visant la réutilisation d'un produit fini considéré comme un déchet, dans une application pouvant être différente de celle d'origine [25].

I.7.2. Production mondiale de la matière plastique

La production mondiale de matières plastiques a atteint un niveau record de 359 millions de tonnes en 2018, soit l'équivalent de 11,38 t par seconde. Ce chiffre a augmenté de 3,2% depuis 2017 et de 3,9% par rapport à 2016, selon la Fédération des producteurs de plastique Plastics Europe...

Pour la troisième fois seulement depuis le début de l'ère industrielle, la production annuelle mondiale de plastique a reculé en 2020, de 0,3%, en raison de la crise sanitaire [26]. Voir sur la **Figure I.10**.

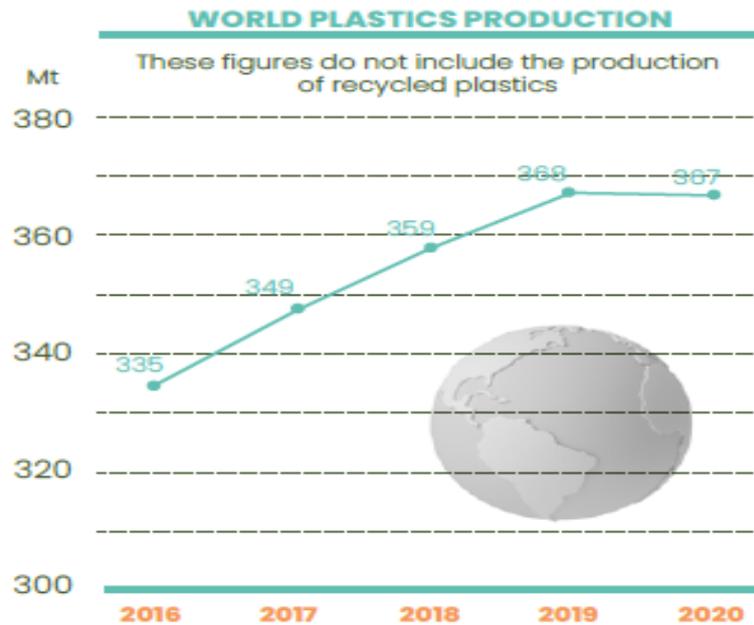


Figure I.10 : Evolution de la production de la matière plastique de 2016 à 2020 [26].

I.7.3. Traitement des déchets plastiques

A Fin d’apprécier l’évolution de la composition des Déchets Ménagers et Assimilés (DMA) et identifier leur potentiel de valorisation, une campagne nationale de caractérisation a été accomplie par l’Agence Nationale des déchets entre avril 2018 et mars 2019.

L’étude a révélé que les déchets plastiques représentent 15.31 % des DMA générés annuellement, soit environ 2.1 millions de tonnes. La répartition des déchets plastiques en sous-catégories a montré que le PEBD est majoritaire avec près de 8.14 % suivi du PET qui représente environ 3.57 % de la quantité globale de déchets produites et de PEHD 1.26%, PVC 0.10%, PP 2.04%, PS 0.21% [27].

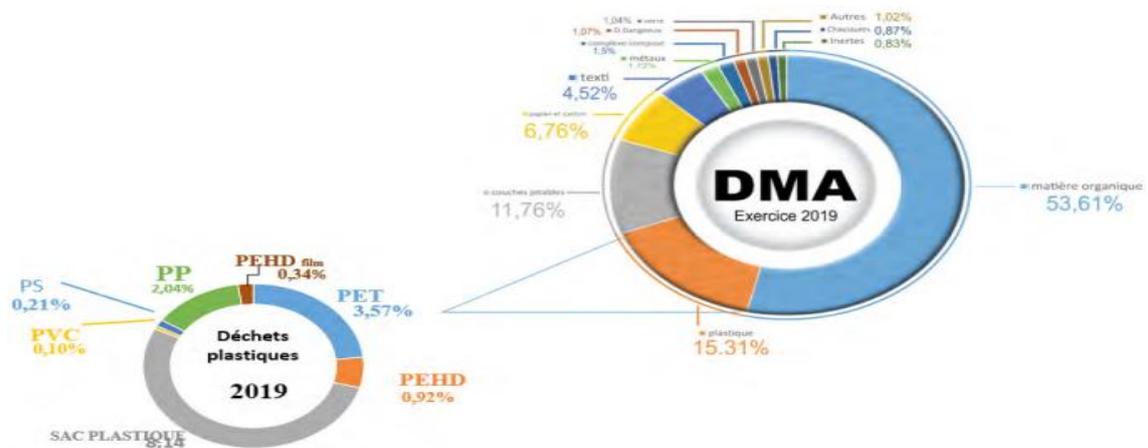


Figure I.11 : Composition des déchets plastiques en 2018 et 2019 en Algérie [27].

I.7.4. Sources des déchets plastiques

Il existe deux sources principales de déchets plastiques :

- Déchets de fabrication : matériaux qui ne sont pas utilisés lors de la transformation ou recyclés immédiatement après la mise en œuvre, ce sont des lavages d'extrudeuse ou de presse à injecter, des objets qui ne sont pas utilisables en raison de défauts.
- Déchets post-consommation : principalement collectés à partir des déchets ménagers et industriels non plastiques. Ces matériaux sont souvent contaminés, mélangés et incompatibles entre eux. Il est donc difficile de simplement les mélanger ou de les compacter pour fabriquer de nouveaux produits [28].

I.7.5. Différentes méthodes de valorisation des déchets plastiques

Il existe deux principales sources de déchets plastiques :

I.7.5.1. Valorisation énergétique

Consiste à utiliser les matières plastiques comme combustibles et à récupérer ainsi l'énergie dégagée. L'opération se déroule dans une unité d'incinération de déchets de matières plastiques [29].

I.7.5.2. Valorisation chimique

Consiste en la décomposition chimique vers les éléments basiques tels que : monomère, oligomère, ou combustible qui seront réutilisables dans les raffineries, la pétrochimie et la chimie.

Nous distinguons quatre méthodes :

- La pyrolyse : la décomposition des molécules par chauffage sous vide ;
- L'hydrogénation : traitement des molécules par hydrogène et de la chaleur ;
- La gazéification : les plastiques sont chauffés en présence d'air ou d'oxygène [29].

I.7.5.3. Valorisation mécanique

Le recyclage mécanique a pour but d'utiliser les matières plastiques usagées dans la production d'un nouvel objet.

Le processus consiste à identifier les différentes sources de déchets du plastique à recycler, à les collecter, les trier, les broyer puis à les régénérer. La séparation est nécessaire à l'obtention de lots de matière purifiés. Le plastique peut être ensuite transformé en produits finis.

Dans ce mode de valorisation, il n'y a pas de destruction majeure de la structure chimique du polymère, tout au plus quelques modifications de ses propriétés physiques. L'inconvénient majeur du recyclage mécanique est la présence d'eau et de contaminants dans le matériau

pendant la mise en œuvre, qui engendre ou catalyse les réactions de dégradation responsable de la diminution de masse molaire de la résine recyclée [29].

I.7.6. Les contaminants avant recyclage du PET et leurs problèmes

Le problème de contamination constitue l'une des barrières à surmonter lors du recyclage du PET. En effet la présence de contaminants tels que les traces de poly (chlorure de vinyl) (PVC), les colles, le papier, l'encre, les colorants, les traces des métaux (issus des catalyseurs de synthèse) l'acétaldéhyde et enfin les traces de détergents contribuent largement à la coloration, à l'altération des propriétés et enfin à la génération de composés indésirables dans les produits recyclés [30].

I.7.7. Etapes de recyclage du PET

La collecte du PET peut se faire par la voie sélective ou par la voie de collecte multi matériaux, ce qui fait que l'étape de tri soit indispensable pour le séparer des autres plastiques collectés. Le tri se fait couramment sur la base de la différence de densité ; le PET et le PVC coulent au fond des baignoires de lavage alors que le polypropylène (PP) et le polyéthylène (PE) flottent. Le PET est ensuite séparé du PVC par d'autres techniques (par infrarouge ou par la diffraction des rayons-X) [25]. Le lavage et la décontamination du PET ainsi séparé, se fait d'abord à l'eau chaude à 80° C puis à l'eau froide afin d'éliminer les traces de détergents utilisés. La décontamination peut se faire par des solvants appropriés ou peut être assurée seulement par le lavage du polymère broyé. Un polymère pur peut être également obtenu par la dissolution du PET dans des solvants et puis sa précipitation dans le méthanol. Le PET récupéré est très pur et complètement décontaminé. Le polymère purifié ainsi obtenu est introduit dans une extrudeuse, granulé et mis en sac en vue de l'acheminer vers un site de recyclage comme il peut être transformé sur place [30].

I.7.8. Etapes de recyclage du PEHD

En général, le processus de recyclage est le même quel que soit le type de résine plastique recyclée.

Les déchets ménagers en PEHD sont constitués de flacons à parois épaisses, comme ceux contenant des produits ménagers, des shampoings et des cosmétiques. La plupart des déchets de PEHD sont dirigés vers la déchiqueteuse, qui déchiquette le matériau. Les déchets de PEHD sont récupérés, lavés et séchés. Par la suite, les copeaux de plastique sont fondus et comprimés par une extrudeuse, puis passés dans une filière, puis découpés en granulés. Ces particules peuvent prendre différentes couleurs selon la matière première utilisée [31]. Ces processus sont illustrés à la **Figure I.12**.

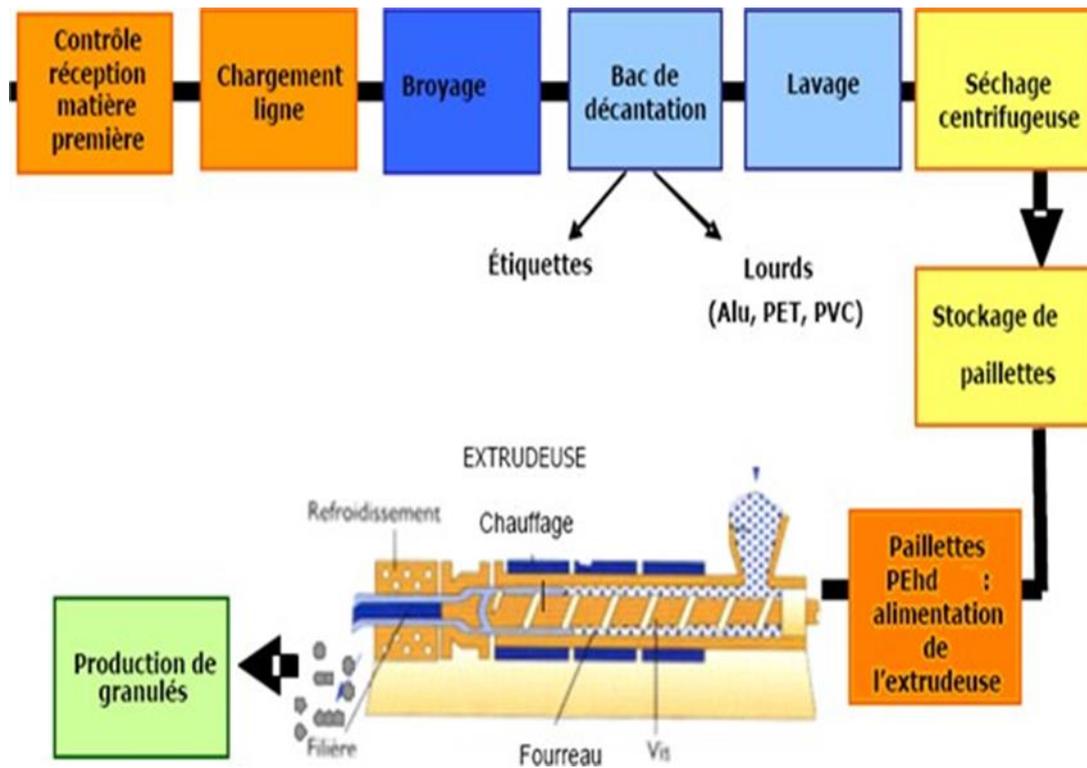


Figure I.12 : Régénération du PEHD [31].

I.7.9. Les avantages du recyclage

Deux avantages majeurs ont été attribués au recyclage :

- La réduction de l'espace de décharge.
- Diminution des émissions des gaz des décharges et des incinérateurs [31].

Chapitre II

Mélange de polymères

Chapitre II : Mélanges de polymères

À l'origine, l'objectif des mélanges était d'améliorer une propriété de base de la matrice, le plus souvent sa résistance aux chocs. Actuellement, de nouveaux enjeux se développent, tels que la réduction des coûts, la réponse à un cahier de charge donné avec le meilleur rapport qualité/coût, la diminution du nombre de grades à produire et des stocks ou encore l'amélioration d'une propriété (tenue thermique, tenue mécanique ou chimique). Pour l'obtention d'une large gamme de caractéristiques et de propriétés, on agit seulement sur la composition des polymères combinés. Les mélanges de polymères peuvent également constituer une voie intéressante pour le recyclage des polymères, en particulier les polyoléfines et le PET.

II.1. Mélanges de polymères

II.1.1. Intérêts des mélanges de polymères [32,33]

D'un point de vue industriel, le fait de réaliser un mélange a pour but d'avoir un « polymères modifiés » pour des applications spécifiques et nouvelles. L'intérêt porté depuis ces dernières années aux mélanges de polymères provient du fait qu'ils constituent un moyen peu onéreux pour réaliser de nouveaux matériaux offrant de vastes spectres de propriétés intermédiaires et parfois même supérieures à celles de leurs constituants. Aussi, mélanger des résines de commodité avec d'autres plus coûteuses va augmenter le taux d'utilisation de ces dernières. Une autre justification réside dans la nécessité de recycler les déchets industriels et ménagers pour diminuer la pollution en utilisant le recyclage et la réutilisation des matériaux plastiques.

II.1.2. Types des mélanges de polymères

II.1.2.1. Mélange miscible

C'est un mélange de polymères qui se comporte comme un système monophasé à l'échelle moléculaire. La miscibilité dépend de la nature des chaînes, de leur longueur, de leur Concentration ainsi que de la température de fusion de chacune [34].

II.1.2.2. Mélange non miscible

Un mélange non miscible est un mélange en phases séparées. Ces matériaux (polymères) ne sont pas réellement des mélanges, ils ne peuvent pas l'être s'ils ne sont pas miscibles. Les propriétés de ce mélange dépendent de la technique et des paramètres de transformation [34].

II.1.2.3. Mélange compatible

Il s'agit d'un groupe de mélanges de polymères mutuellement non miscibles mais compatibles, de telle sorte qu'un malaxage convenable permette de former des structures dont la taille des domaines de phases miscibles est inférieure aux domaines de phases des polymères incompatibles. Le terme compatible est essentiellement utilitaire pour qualifier les mélanges homogènes à l'œil nu, avec modification des propriétés interfaciales ou/et de la morphologie [34].

II.2. Stratégie d'élaboration des mélanges polymériques

La préparation des mélanges de deux ou plusieurs polymères peut être conduite généralement selon deux voies [35, 36] :

- Le mélange à l'état fondu
- Le mélange en solution

II.2.1. Mélange à l'état fondu

Dans cette méthode, les constituants sont mélangés à l'aide d'une extrudeuse ou d'un mélangeur, la température de transformation étant supérieure à la température de fusion des constituants pour que la dispersion soit efficace. Les forces de cisaillement engendrées par le malaxage peuvent provoquer une dégradation partielle des mélanges. Contrairement à la précédente technique, cette méthode est la plus répandue à l'échelle industrielle. Cependant, en pratique, il est très difficile d'avoir de nouveaux matériaux ayant des propriétés améliorées par un simple malaxage, du fait de certains problèmes fondamentaux et inhérents et certaines situations à l'interface qui rendent la réalisation des mélanges une opération moins favorable. Du point de vue thermodynamique, la majorité des paires de polymères sont immiscibles, ce qui exclut la génération de véritables produits homogènes [37].

II.2.2. Mélange en solution

La réalisation des mélanges de polymères en solution sert à mélanger les deux polymères dans un même solvant, après, le mélange obtenu doit être récupéré à partir de la solution par précipitation ou par évaporation du solvant. Cette méthode est plus utilisable à l'échelle du laboratoire que l'échelle industrielle à cause du coût élevé des solvants organiques, et de la difficulté de les enlever complètement [38].

II.3. Thermodynamique des mélanges de polymères

À l'équilibre, un mélange de deux polymères amorphes peut exister sous forme d'une seule phase dans laquelle les segments des deux composants macromoléculaires sont intimement mélangés, ou sous forme de deux phases séparées constituées chacune essentiellement d'un polymère. Ces deux états de phase sont gouvernés par les principes de la

thermodynamique selon laquelle, un système monophasique et homogène est formé quand l'énergie libre du mélange ΔG_m est négative :

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T \Delta S_m$$

ΔH_m : Enthalpie du mélange

T : Température absolue

ΔS_m : Entropie du mélange

ΔG_m doit également satisfaire une deuxième condition qui assure la miscibilité et prévient la Séparation de phase :

$$\left(\frac{\partial^2 \Delta G_m}{\partial \phi_i^2} \right)_{T,P} > 0$$

Φ_i étant la fraction volumique d'un composant i dans le mélange et T et P sont respectivement la température et la pression.

Quand deux polymères de hauts poids moléculaires sont mélangés, le gain en entropie ΔS_m est négligeable et de ce fait l'énergie libre du mélange ne peut être négative que si l'enthalpie ΔH_m du mélange est négative. En d'autres termes, l'opération de malaxage doit être exothermique ce qui exige des interactions spécifiques entre les composants du mélange. Ces Interactions peuvent varier des forces ioniques très fortes aux faibles interactions telles que les liaisons hydrogène, et les interactions du type ion- dipôle, dipôle- dipôle ou encore donneur accepteur. Tous ces effets contribuent à l'obtention d'une énergie libre de mélange négative et la miscibilité du système une autre caractéristique du diagramme de phases des mélanges de polymères est que pour la plupart des systèmes homogènes, une augmentation de la température entraîne souvent une séparation de phase. Chaque paire de polymères est caractérisée par un paramètre d'interaction qui exhibe cette dépendance de la température et qui indique qu'une miscibilité obtenue à faible température peut être perdue à hautes températures. Ceci se produit à une température caractéristique appelée température de solution critique inférieure (Lower critical solution température) (LCST). La température de solution critique supérieure (Upper critical Solution température) (UCST) existe souvent dans le cas des systèmes contenant des solutions, mais elle est moins fréquente dans le cas des mélanges de polymères [39].

II.4. Morphologies des mélanges

La morphologie est la forme prise par les phases d'un mélange et/ou leur arrangement l'une par rapport à l'autre. Lorsque deux polymères immiscibles sont mélangés à l'état fondu à l'aide d'un mélangeur interne ou une extrudeuse bi-vis, la morphologie du mélange obtenu (taille, forme, distribution d'une phase dans l'autre) dépendra fortement de l'histoire mécanique qu'il a subie pendant la mise en œuvre (température, pression, nature d'écoulement, ...), et

aussi les paramètres du mélange lui-même (viscosité et la tension interfaciale). Les morphologies prises par un système de deux polymères peuvent être divisées en trois classes [39], comme le montre la **figure II.1** :

- **La morphologie à phase dispersée** : la phase dispersée peut adopter une forme quelconque (nodule, fibrille, ... etc.). Ainsi, dans le mélange binaire polystyrène (PS)/polybutadiène (PB), la phase PB se met sous forme de petits nodules qui forment la phase dispersée, alors que la phase PS constitue la phase continue ou la matrice [40].
- **La morphologie à phases stratifiée ou lamellaire** : les deux constituants s'interpénètrent dans deux dimensions. Dans le système réalisé à partir de PET et de poly (alcool vinylique) (PVA), le mélange obtenu se sépare sous forme de couches [40].
- **La morphologie co-continue** : les phases sont simultanément continues et forment un réseau de type éponge [40].

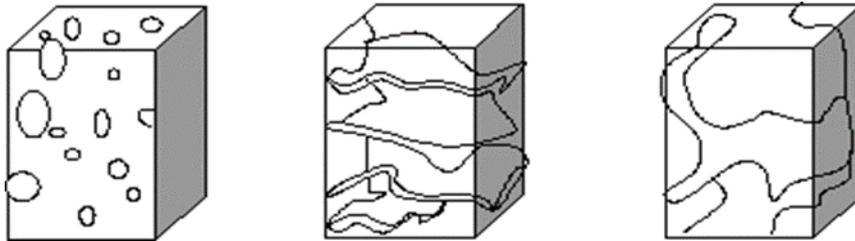


Figure II.1 : Types des morphologies possibles dans les mélanges polymériques [40].

II.5. Présentation des mélanges PET/PEhd

Les polyoléfines sont des polymères apolaires au contraire des polytéréphtalates d'alkylène qui, de par leurs groupements carbonyles, présentent un caractère polaire évident. De ce fait, les polymères de ces deux familles sont immiscibles et forment lors de leur mise en œuvre des mélanges incompatibles. Leurs propriétés mécaniques sont médiocres mais peuvent être améliorées en contrôlant précisément le degré de dispersion d'une phase dans l'autre. Ceci peut être notamment réalisé en jouant sur les conditions du mélange (vitesse de cisaillement, température...). Par analogie, on peut donc considérer que ces mélanges de polymères se comportent comme des émulsions.

L'ajout d'un copolymère peut permettre de créer de nombreuses liaisons entre les différentes phases, et donc de stabiliser les nodules de la phase dispersée dans la phase 'matrice'. La tension interfaciale entre les deux phases diminue ce qui améliore les propriétés mécaniques des mélanges. Mais pour des raisons de coût, nous n'utiliserons pas de compatibilisants dans nos mélanges.

Afin de mieux appréhender le recyclage des matières plastiques et de mieux comprendre les interactions entre le polyéthylène et le polyéthylène téréphtalate, seuls des mélanges PET / PEhd ont été étudiés [41].

II.5.1 Propriétés rhéologiques des mélanges PET/PEhd non-compatibilisés

La rhéologie des mélanges suivant plus ou moins une loi d'additivité, nous pouvons penser, en première approximation, que la viscosité des mélanges PET/PEhd se trouve entre les valeurs des viscosités des polymères parents [41].

II.5.2. Viscosité des polymères parents

Dagli et Kamdar nous donnent les viscosités séparées d'un PET et d'un PEhd à 280°C. Pour ces produits, nous nous apercevons que suivant le taux de cisaillement, la viscosité des deux polymères évolue de telle façon qu'à faible taux de cisaillement, la viscosité du PEhd est plus forte que celle du PET, alors que la situation inverse est constatée pour des taux plus forts **Figure II.2 (a)**. Mais nous pouvons aussi nous interroger sur la température de l'essai. Alors qu'à 280°C le PET se trouve un peu au-dessus de son point de fusion (265°C), le PEhd qui a un point de fusion beaucoup plus bas (128-135°C) peut très bien avoir réticulé où s'être dégradé, ce qui provoquerait une variation de sa viscosité. Dans un second temps, Dagli et Kamdar ont suivi l'évolution du rapport de la viscosité du PET sur celle du PEhd à différentes températures. le graphique de la **Figure II.2 (b)** montre que ce rapport évolue pratiquement régulièrement en fonction du taux de cisaillement quelle que soit la température [41].

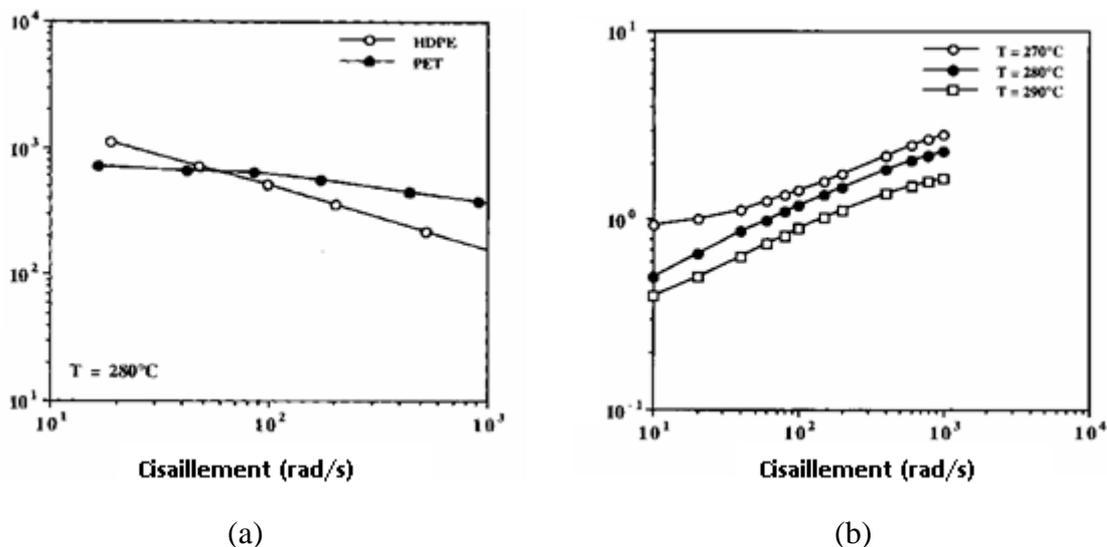


Figure II.2 : Evolution de la viscosité du PET et du PEhd en fonction du taux de cisaillement à 280°C (a), Evolution du rapport des viscosités PET/PEhd en fonction du taux de cisaillement pour différentes températures (b)[41].

II.5.3. Viscosité de mélanges de composition majoritaire en PET

Dans le cas d'un mélange PET/PEhd (80/20) sollicité à de fortes déformations, en régime permanent, à $T=270^{\circ}\text{C}$, la viscosité ne semble pas dépendre du taux de cisaillement **Figure II.3**.

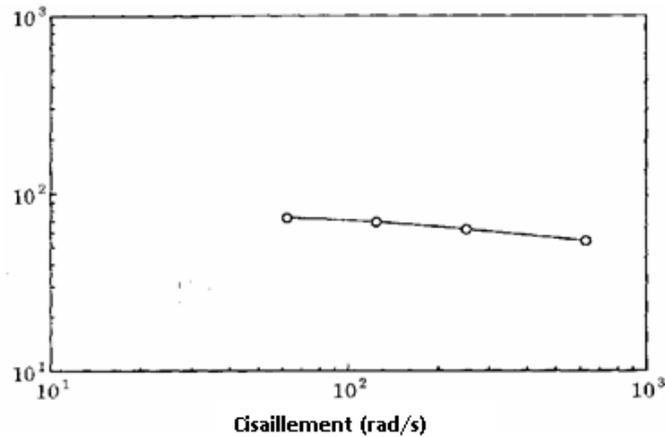


Figure II.3 : Evolution de la viscosité d'un mélange PET/PEhd (80%/20%) en fonction du taux de cisaillement [41].

Park et al. ont étudié la viscosité d'un mélange PET/PEhd (80%/20%) en mode dynamique et l'ont comparée à celle d'un PET pur. Celui-ci présente une faible viscosité et une faible sensibilité au cisaillement, ce qui permet de conclure à un comportement newtonien. La viscosité du mélange non-compatibilisé se révèle plus forte pour les mêmes fréquences et le mélange est plus sensible au cisaillement **Figure II.4 (a)** [41].

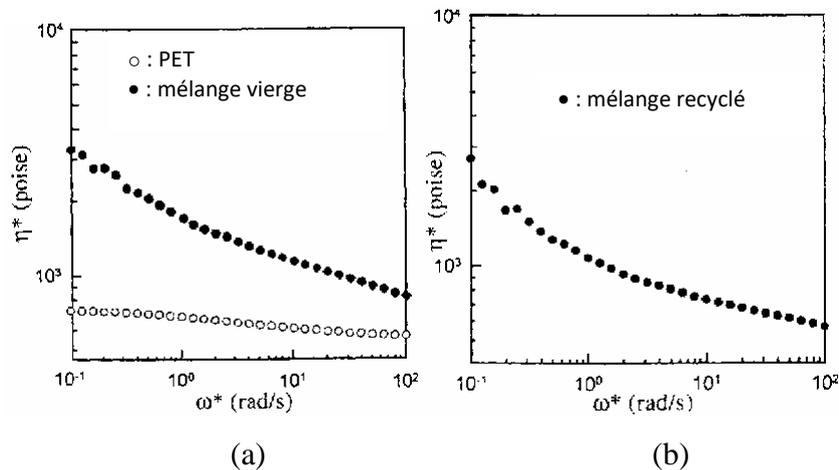


Figure II.4 : Viscosité complexe d'un mélange PET/PEhd (80%/20%) vierges en fonction de la fréquence 280°C (a), Viscosité complexe d'un mélange PET/PEhd (80%/20%) recyclés en fonction de la fréquence à 280°C (b) [41].

Ces résultats confirment que l'ajout de PEhd dans du PET à l'état fondu provoque une augmentation de la viscosité à faible taux de cisaillement ainsi qu'une plus forte sensibilité à la

vitesse de déformation. Dans le cas d'un mélange de matériaux recyclés de mêmes concentrations, nous nous apercevons que la viscosité complexe n'a pas trop été influencée par la nature du matériau. L'extrusion d'un tel mélange recyclé devrait être comparable à celle d'un mélange vierge **Figure II.4 (b)** [41].

II.5.4. Viscosité de mélanges de composition majoritaire en PEhd

Lorsque le PEhd est la phase majoritaire, le mélange présente une viscosité inférieure à celle du PEhd pur. Son comportement rhéologique suit celui du PEhd, ces mélanges étant sensibles au cisaillement. La viscosité diminue ainsi fortement avec la fréquence de cisaillement.

L'ajout de PET réduit donc la viscosité du mélange et amène des valeurs inférieures à celles prévues par la loi d'additivité [41].

II.5.5. Fluidité à chaud

Un autre paramètre caractérisant la viscosité est l'indice de fluidité à chaud (MFI). Celui des mélanges de PET/PEhd évolue en fonction de la proportion de PET présente dans le mélange. Il augmente régulièrement pour des proportions grandissantes de PET puis chute brutalement lorsque la composition du mélange atteint 75%, ce qui est dû vraisemblablement à l'inversion des phases dans le mélange **Figure II.5** [41].

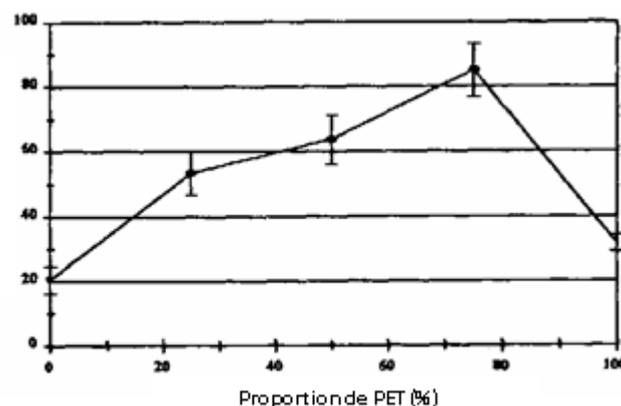


Figure II.5 : Evolution de l'indice de fluidité à chaud d'un mélange PET/PEhd en fonction de la proportion de PET [41].

L'ajout de PET va diminuer la viscosité du mélange, ce qui va entraîner un flux de matière plus important et donc un MFI plus important. Enfin, Carter a montré qu'il existait une corrélation forte entre la fluidité à chaud des mélanges PET/PEhd et leurs passés thermomécaniques. Il montre, par exemple, l'influence du nombre d'extrusions subies par les mélanges à $T=270^{\circ}\text{C}$ sur leur fluidité à chaud, la diminution de celle-ci étant plus importante pour des mélanges à forte proportion de PEhd [41].

II.6 PET bouteille à l'emballage alimentaire

La part croissante des polymères dans le secteur de l'emballage alimentaire pousse à une valorisation du PET recyclé dans ce domaine. Les problèmes de contamination de ce polymère au cours de son utilisation et de son recyclage entraînent une méfiance légitime des autorités nationales, européennes et du consommateur, malgré une bonne connaissance du matériau par la communauté scientifique.

II.6.1 Contraintes techniques

Parce qu'elle est liée à la sécurité sanitaire, la fabrication de films alimentaires est très contrôlée. En 1999, la part de PET recyclé utilisée pour la fabrication d'emballages alimentaires multicouches aux Etats-Unis était de l'ordre de 7 % [42] tandis que celle destinée à la fabrication de fibres était de 59 %, parce que les processus de transformation ne permettaient pas d'obtenir des films aux normes imposées par la législation. Le recyclage mécanique est quant à lui plus limité, parce que la dégradation du polymère pendant la mise en forme n'est pas encore maîtrisée. L'utilisation d'anti-oxydants ou d'allongeurs de chaînes pour limiter la perte de viscosité liée à la dégradation du polymère est très réglementée, alors que les viscosités intrinsèques limites imposées à la production de films alimentaires sont comprises entre 0,60 et 0,70 dl/g. Le tableau 6 précise les propriétés nécessaires au PET recyclé pour être retransformé (par injection, thermoformage, extrusion soufflage, calandrage).

Tableau II.1 : Minimum requis pour la transformation à l'état fondu de paillettes de PET recyclé D'après F. AWAJA et al. [43]

Propriétés	Valeurs
Viscosité intrinsèque	>0,7 dl/g
Température de fusion	>240°C
Taux d'humidité	<0,02% en poids
Taille des paillettes	0,4 < D < 8 mm
Quantité de colorants	<10 ppm
Indice de jaunissement	<20
Quantité de métaux	<3 ppm
Quantité de PVC	<50 ppm
Quantité de polyoléfines	<10 ppm

Le film issu du recyclage doit avoir des propriétés barrières irréprochables pour éviter toute contamination de l'aliment par le film ou par son environnement. Les propriétés mécaniques sont elles aussi très importantes. C'est pour cela que la viscosité du matériau mis en forme est un élément normé. La difficulté de la valorisation mécanique réside également dans la constitution même des matériaux recyclés : les bouteilles que l'on trouve dans le commerce sont très souvent constituées de PET copolymérisés avec du diéthylène glycol ou de l'acide isophtalique – entre autres – en différentes proportions afin de diminuer le taux de cristallinité et donc l'opacité du matériau. D'après D.M. FANN et al. [44], ces unités favorisent la dégradation thermique du matériau. C'est donc un élément à prendre en considération : le produit recyclé est constitué d'un mélange de comonomères dont le comportement thermique n'est pas forcément équivalent à celui du PET vierge.

Tableau II.2 : Températures de fusion des polymères (fiche technique) [45].

Type	Sigles	Point de fusion	Température d'utilisation
Acrylonitrile butadiène styrène	ABS	130 °C	60 °C / -35 °C
POMC ou POM	165 °C	100 °C / -40 °C	Ertacetal
Polyamide 6, 6	PA6-6	255 °C	120 °C / -30 °C
Polyamide 6	PA6	220 °C	100 °C / -40 °C
Polycarbonate	PC	230 °C	135 °C / -60 °C
Polyster thermo Plastique ou Polyéthylène téréphtalate	PETP ou PET	255 °C	100 °C / -20 °C
Polyester thermo plastique transparent	255 °C	150 °C / -20 °C	Griphen, Vivak, Vectan
Polyétheréthercétone	PEEK	220 °C	(250 °C) ? / -60 °C
Polyéthylène basse densité	PEBD	?	70 °C / ?

Polyéthylène haute densité 300	PEHD 300	130 °C	80 °C / -100 °C
PEHD 500		135 °C	80 °C / -100 °C
PEHD 1000		138 °C	80 °C / -260 °C
Polyméthacrylate méthyle coulé	de PMMA plexi gs	180 °C	70 °C / -40 °C
Polyméthacrylate méthyle extrudé	de PMMA plexi XT	168 °C	70 °C / -40 °C
Polypropylène	PP	163 °C	100 °C / -10 °C
Polystyrène	PS	160 °C	60 °C / -10 °C
PTFE		325 °C	260 °C / -200 °C
		190 °C	Téflon
		100 °C / - 10 °C	
PVC		125 °C	60 °C / -10 °C
PVDF		173 °C	140 °C / -40 °C

Chapitre III
Matériaux et techniques
expérimentales

Chapitre III Matériaux et techniques expérimentales

III.1. Objectifs de l'étude

Le chapitre « Matériaux et techniques expérimentales » a pour objectif de présenter une description générale des matériaux utilisés, les différents protocoles expérimentaux ainsi que les techniques de caractérisation. En premier lieu on présente les différents produits utilisés dans notre mélange. En outre, on expose les méthodes de mise en œuvre pour réaliser des formulations des mélanges et au final on décrit les techniques de caractérisation appliquées pour analyser ces formulations.

III.2. Matériaux

III.2.1 Matériaux utilisés à l'université

Le PET recyclé (PETr) utilisé dans ce travail c'est des bouteilles d'eau minérale qui porte le nom lalla khedidja de couleur transparente.



Figure III.1 : Le PET recyclé (PETr) utilisé sous forme de paillette, à l'université de Bejaia.

Le PEHD recyclé (PEHDr) utilisé dans ce travail c'est des bouteilles du savon lessive liquide de marque le chat et de couleur blanche, est de dimension inférieure à 4mm.



Figure III.2 : : Le PEHD recyclé (PEHDr) utilisé sous forme de paillette, à l'université de Bejaia.

III.2.2 Matériaux utilisée au niveau de l'industrie

Le PET recyclé cristallisé (PETrC) utilisé dans ce travail a été fourni par l'entreprise Revaplast, située dans la région de Akbou Bejaia et qui est spécialisée dans le recyclage des bouteilles en PET. L'échantillons est de couleur transparente est de dimension entre 4 et 8mm.



Figure III.3 : Le PET recyclé (PETr) utilisé sous forme de paillette, fourni par l'entreprise Revaplast.

Le PEHD recyclé (PEHD_r) utilisé dans ce travail a été fourni par l'entreprise Revaplast, de couleur noir est de dimension entre 4 et 8mm.

III.3. Techniques expérimentale

III.3.1. Préparation des échantillons en PETr

Après la collecte des bouteilles, puis coupé en fils à l'aide d'un ciseau, puis en paillettes de dimension inférieure à 4mm, les paillettes sont lavées et séchées.

III.3.2. Préparation des échantillons en PEHD_r

Après la collecte des bouteilles, puis coupé en fils à l'aide d'un ciseau puis en paillettes de dimension inférieure à 4mm, les paillettes sont lavées et séchées.

III.3.3 Cristallisation des paillettes en PETr utilisée au niveau de l'industrie

L'étape de cristallisation des paillettes de PETr a été effectuée dans un cristalliseur rotatif maintenu à 150°C et ce pendant une durée de 5 h et sous vide. Cette étape a été réalisée dans l'entreprise Revaplast. La cristallisation du PETr est une étape décisive dans notre travail et a pour but d'éliminer l'humidité résiduelle des paillettes de PETr. Après cette opération, les paillettes en PETr cristallisé sont notées PETrC.

III.3.4 Préparation des mélanges (PET/PEHD) recyclés par extrudeuse :

III.3.4.1 Extrudeuse utilisé à l'université

La réalisation de formulations de polymères recyclés et de leurs mélanges sans agent compatibilisant, a été effectuée au moyen d'une extrudeuse mono vis, de type Controlab ayant un diamètre de vis de 25 mm et un rapport ($L/D=20$). Les températures qui ont été utilisées dans chaque zone sont :

- température de la zone 1 : 148°C.
- température de la zone 2 : 230°C.
- température de la zone 3 : 260°C.

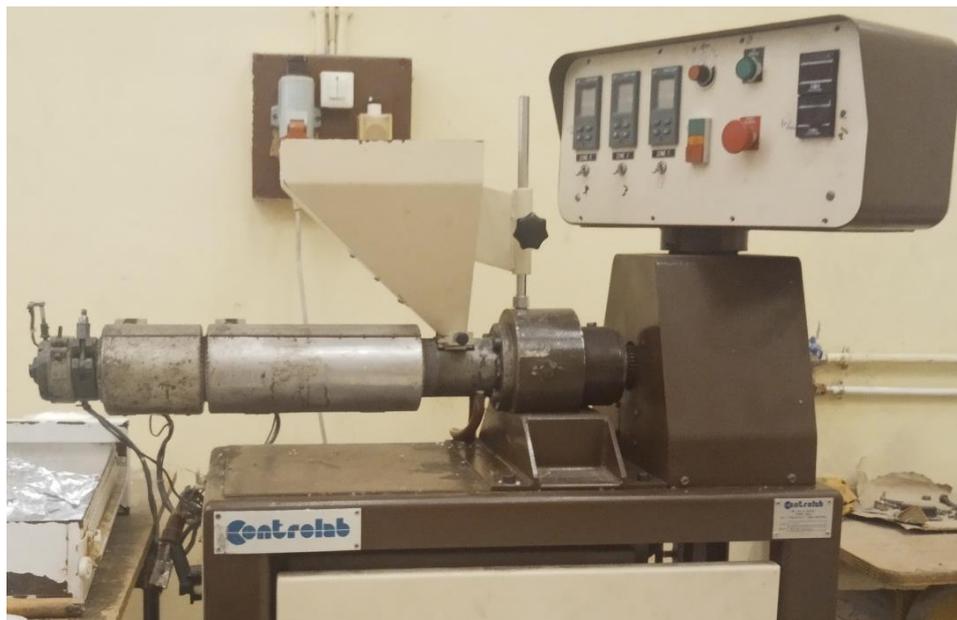


Figure III.4 : Extrudeuse mono vise type Controlab, Au niveau de hall des polymères Sétif

La vitesse de rotation de la vis est de 25 tours/min. Chaque cycle d'extrusion a été précédé d'un étuvage soigné à 100°C pendant 24 heures.

Ce mode d'extrusion fournira aussi l'effort nécessaire pour améliorer les interactions entre les deux polymères recyclés totalement incompatibles.

Selon la composition du système à préparer, des lots de PETr ont été introduits simultanément avec la proportion correspondante de PEHDr dans une extrudeuse chauffée à une température de 260°C, sauf pour les formulations PETr/PEHDr (0/100), pour lesquelles la température de l'extrudeuse a été de 200°C. La préparation des mélanges a été effectuée au sein du Hall des Polymères à l'université Ferhat Abbas-Sétif 1.

Tableau III.1 : Formulations des mélanges (PET/PEHD) –R réalisés au niveau de hall des polymères Sétif

Mélange	1	2	3	4
PETr	50%	70%	80%	90%
PEHDr	50%	30%	20%	10%

III.3.4.2 Extrudeuse au niveau industriel

La préparation des mélanges de PETrC/PEHDr sont réalisées dans une extrudeuse mono vis de type Negri Bossi Cambio 500, ayant un diamètre de vis de 100 mm et un rapport ($L/D=20$). Les températures qui ont été utilisées dans chaque zone sont :

- température de la zone 1 : 195°C.
- température de la zone 2 : 200°C.
- température de la zone 3 : 205°C.
- température de la zone 4 : 215°C.
- température de la zone 5 : 220°C.
- température de la zone 6 : 230°C.

La vitesse de rotation de la vis est de 366 tours/min. Chaque cycle d'extrusion a été précédé d'un étuvage soigné à 100°C pendant 24 heures. La préparation des mélanges a été faite au niveau de l'industrie Maziplast située dans la région de Akbou Bejaia spécialisée dans la fabrication d'emballage en plastiques.



Figure III.5 : Extrudeuse mono vise type Negri Bossi Cambio, au niveau de l'entreprise Maziplast Akbou

Tableau III.2 : Formulations des mélanges PETrC/PEHDr, réalisés au niveau del'entreprise Maziplast Akbou

Mélange	1	2	3
PETrC	50%	70%	80%
PEHDr	50%	30%	20%

III.4 Techniques expérimentales

III.4.1 Spectrophotométrie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)

L'analyse spectrale des formulations préparées a été réalisée au moyen d'un spectrophotomètre infrarouge à double faisceaux et à transformée de Fourier du type IRAffinity-1. Pour cela, des pastilles ont été préparés par pression à chaud dans une presse manuelle du type Shimadzu, pendant une durée de 3 minutes. Le test a été réaliser au sein dulaboratoire génie des procédés à l'université de Bejaïa.



Figure III.6 : Pastilleuse manuelle type Shimadzu, au niveau du laboratoire génie desprocédés à l'université de Bejaïa.

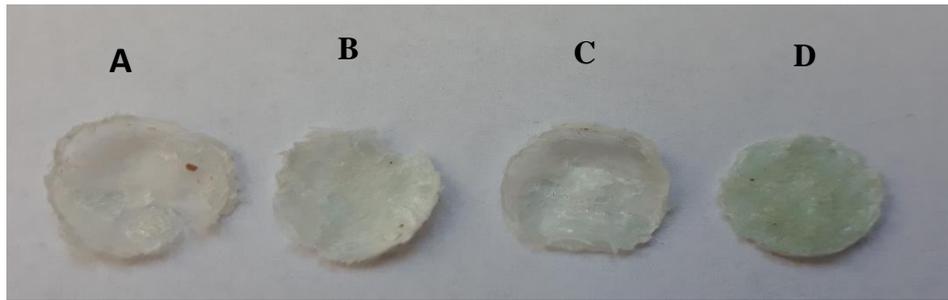


Figure III.7 : Les pastilles préparés par compression dans une presse manuelle, mélange (PET/PEHD) -R, A (50% /50%) -R, B (70%/30%) -R, C (80% /20%) -R, D (90%/10%)-R, réalisés au laboratoire génie des procédés de Bejaïa

III.4.1 Préparation des éprouvettes des essais mécaniques par compression

Après l'étuvage des différentes formulations à 100°C pendant 24 heures, les éprouvettes destinées aux essais de choc et de traction ont été réalisées par moulage par compression dans une presse hydraulique du type Carver. Le processus de moulage des échantillons d'une épaisseur égale à 3 mm, a été effectué à une température de 260°C et sous une pression égale 0.50 m/s². La durée du moulage a été de 12 minutes dont 7 minutes pour le préchauffage et 5 minutes pour la compression et le dégazage. A leur sortie de la presse, les échantillons ont été refroidis à l'air libre pendant 5min puis extraits délicatement du moule. La réalisation des éprouvettes destinées au test de choc ont été effectuer au sein du laboratoire Hall des Polymères à l'université de Ferhat Abbas-Sétif 1.



Figure III.8 : Presse hydraulique du type Carver, effectuée au sein du laboratoire Hall des Polymères à l'université de Ferhat Abbas-Sétif 1.

III.4.2 Mesure de l'indice de fluidité (IF)

Les mesures de l'indice de fluidité (IF) des différentes formulations ont été effectuées au moyen d'un fluidimètre type Melt-Indexer modèle 5 qui consiste en un cylindre d'axe vertical se terminant à son extrémité inférieure par une filière standard d'une longueur égale à 8 mm et d'un diamètre de 2.09 mm.

Les essais ont été réalisés à une température de 260°C, sauf les formulations (PET/PEHD) -R (0%/100%) où la température est de 200°C, et sous une charge de 1,2 Kg selon la procédure standard **ASTM D1238** qui permet le calcul de l'**IF** selon l'expression :

$$IF (g / 10 \text{ min}) = 600 \times (m) / (t) \quad (\text{Eq.1})$$

Où **m** et **t** représentent respectivement la masse extrudée et le temps de mesure.

Les mesures ont été effectuées au sein de Hall des Polymères à l'université Ferhat Abbas-Sétif.



Figure III.9 : Appareil de mesure de l'indice de fluidité (IF), réalisés au Hall des Polymères à l'université de Ferhat Abbas-Sétif 1.

III.4.3 Essai de choc Charpy (Essai de Résilience)

L'essai de choc Charpy a été réalisé sur un appareil de type Ceast, consistant en un pendule portant à son extrémité libre un marteau et en un support pour éprouvette. Le choc est donné au centre de l'éprouvette par un marteau qui peut délivrer une énergie de 7,5 J. Les éprouvettes ont les dimensions (2x12x63) mm³. L'énergie de fracture ou résilience a_n est calculée selon l'équation suivante :

$$a_n = \frac{An}{l \times e} \quad (\text{Eq. 2})$$

An étant l'énergie cinétique en Joule absorbée par l'éprouvette au moment de l'impact alors que l et e sont respectivement la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette.



Figure III.10 : Appareils d'essai Charpy de type Ceast, réalisés au Hall technologie de l'université de Bejaia.

III.5 Microscopie électronique

La microscopie électronique a été utilisée afin de caractériser la surface de fracture des échantillons après l'essai de choc et ce dans le but de mettre en évidence les effets des mélanges (PET/PEHD) -R sur le mécanisme de rupture. Les observations microscopiques ont été réalisées grâce à un microscope électronique de type PHYWE.



Figure III.11 : La microscopie électronique de type PHYWE, réalisés au Hall technologie de l'université de Bejaia.

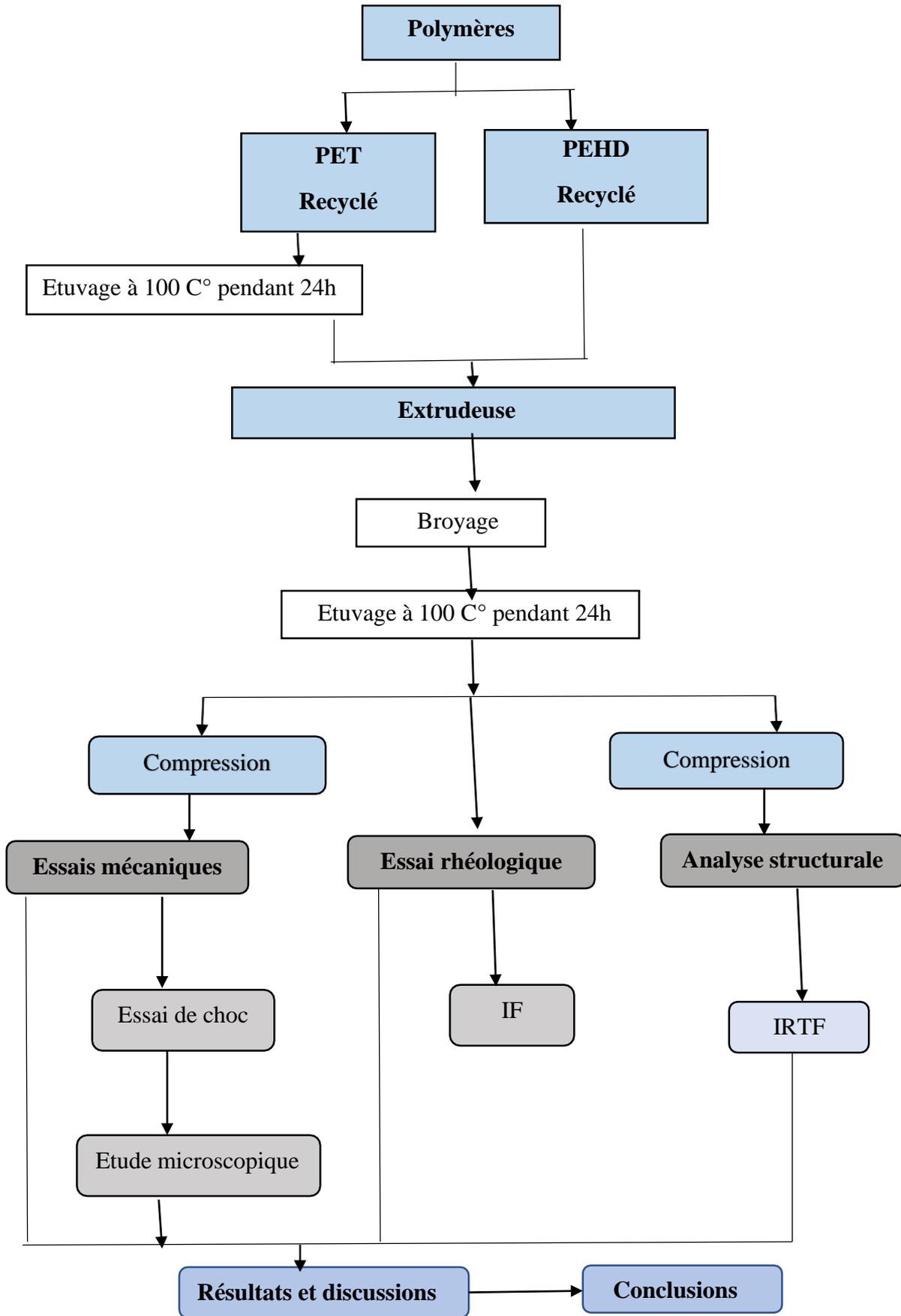


Figure III.12 : Protocole expérimental à l'université

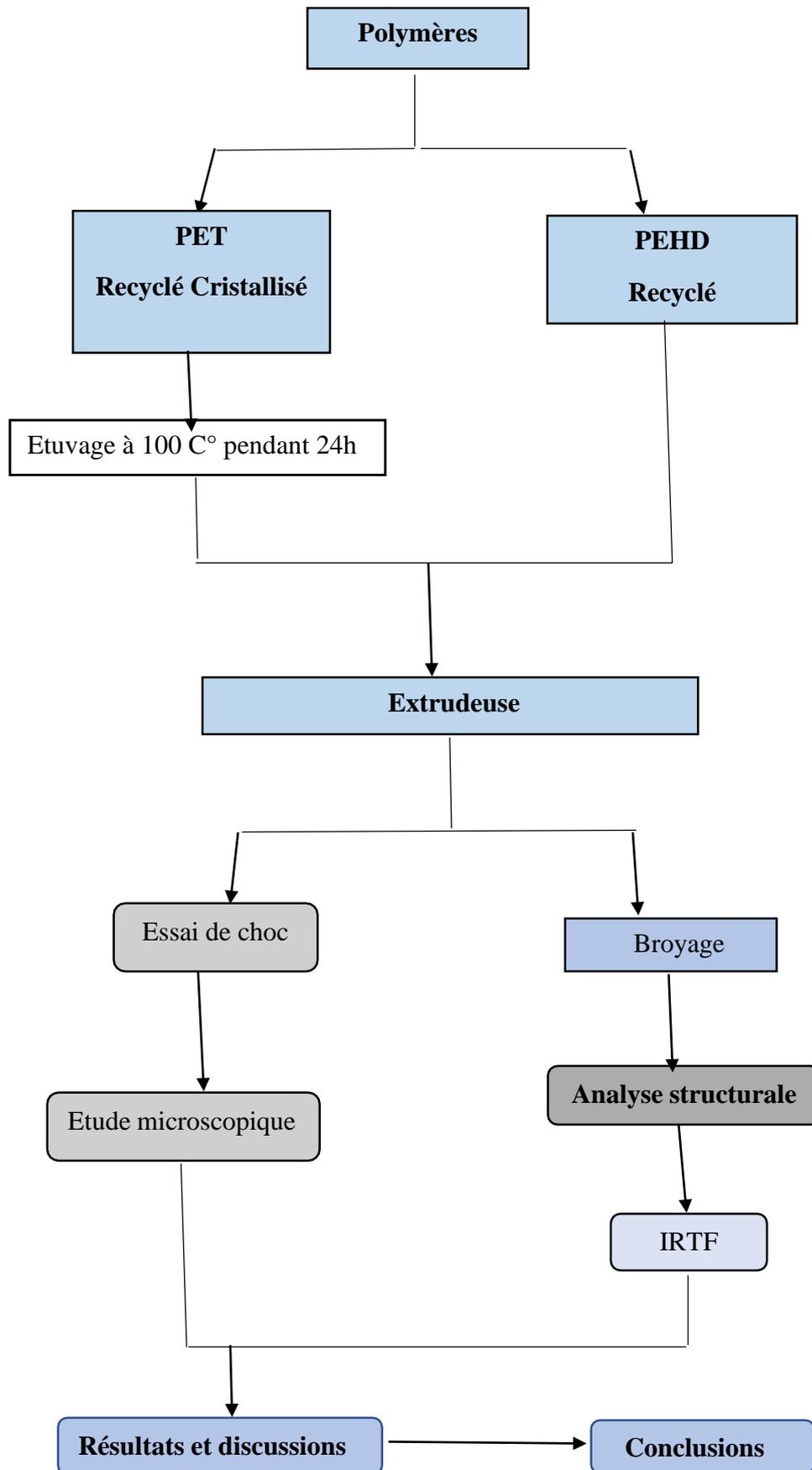


Figure III.13 : Protocole expérimental industriel

Chapitre IV

Résultats et discussions

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV -1 Résultats de l'analyse infrarouge

IV.1.1 Analyse infrarouge des mélanges (PET/PEHD) –R réalisé à l'université Sétif

La **figure IV-1** regroupe les spectres IRTF des mélanges (PET/PEHD) -R avec différentes proportions préparés à l'université , sont pratiquement identiques et montrent une bande d'intensité moyenne est visualisée vers 720 cm^{-1} et caractéristique des vibrations de déformation par balancement des C-H des groupements $(\text{CH}_2)_n$, quand il y a plus de 4 méthylènes $-\text{CH}_2-$ liés, et la vibration de déformation symétrique du groupement $-\text{CH}_2-$ vers 1480 cm^{-1} , et les vibrations d'élongation symétrique et asymétrique des liaisons C-H du groupement $-\text{CH}_2$ aliphatique dans l'intervalle compris entre 2980 et 2830 cm^{-1} .

Et aussi une bande vers 1720 à 1740 cm^{-1} correspondant au groupement carbonyle de la fonction ester ($\text{C}=\text{O}$), et une élongation C-O des éthers correspondant au groupement C-O-C vers 1100 cm^{-1} .

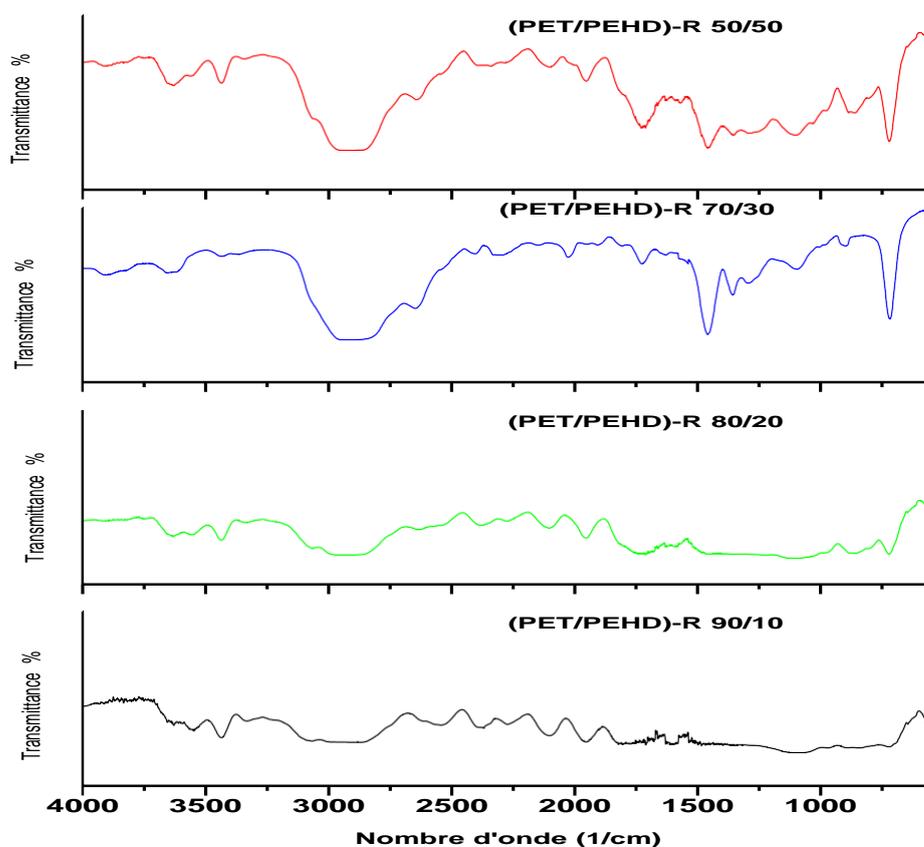


Figure IV.1 : Spectre Infrarouge des mélanges (PET/ PEHD) -R à l'université

IV.1.2 Analyse infrarouge des mélanges (PET/PEHD) -R réalisé à l'industrie

Les spectres IRTF représentés par la **figure IV-2** sont pratiquement identiques et montrent les vibrations d'élongation symétrique et asymétrique des liaisons C-H du groupement -CH₂ aliphatique dans l'intervalle compris entre 2980 et 2830 cm⁻¹, une bande d'intensité moyenne est visualisée vers 720 cm⁻¹ et est caractéristique des vibrations de déformation par balancement des C-H des groupements (CH₂)_n, et une bande vers 1740 cm⁻¹ correspondant au groupement carbonyle de la fonction ester (C=O).

Et aussi une bande d'élongation asymétrique C-O-C des époxydes dans l'intervalle compris entre 810-950 cm⁻¹, ainsi qu'une déformation observée vers 1580-1650 liaisons -NH₂ due au colorant.

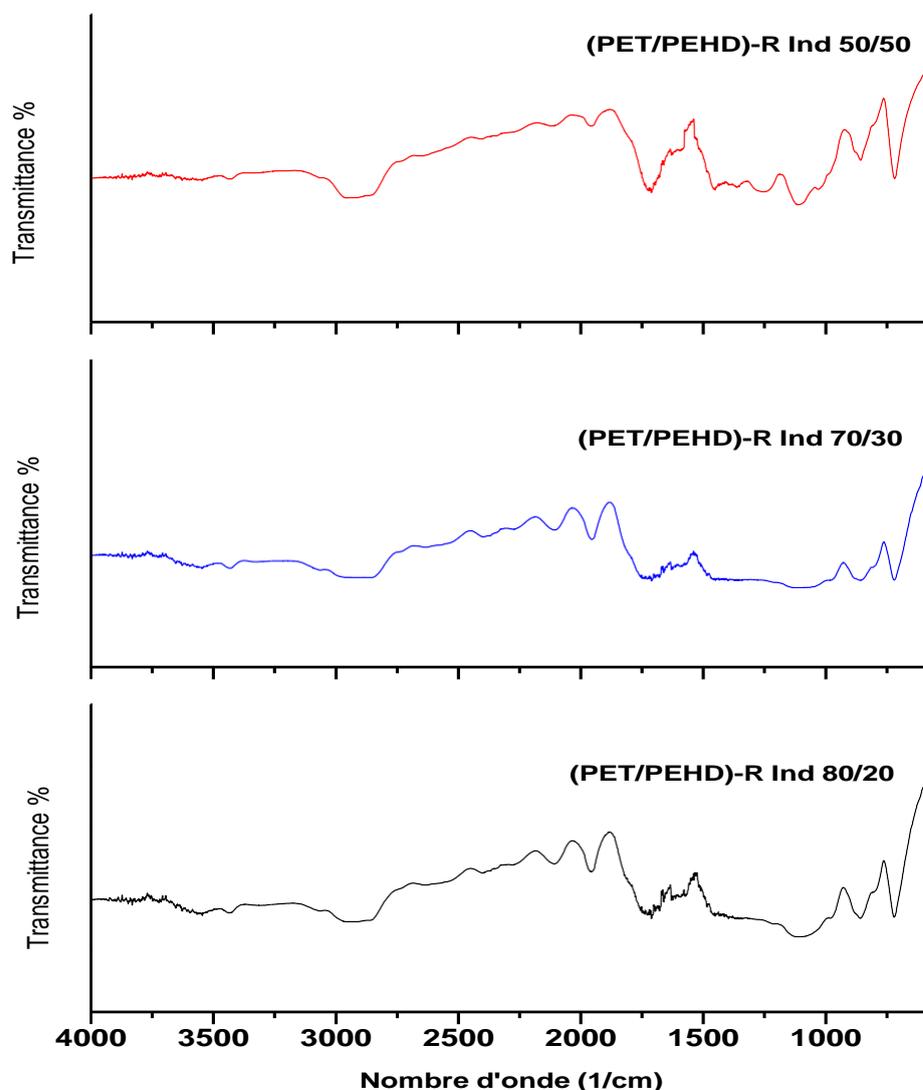


Figure IV.2 : Spectre Infrarouge des mélanges (PET/ PEHD) –R au niveau industriel

IV .2 Mesure de l'indice de fluidité (IF)

La **figure IV.3** expriment les variations de l'indice de fluidité (IF) des polymères recyclés et de leurs mélanges supportent bien les résultats des variations du couple et sont en faveur de l'occurrence d'une nette régression des processus de dégradation des deux polymères, on observe que la présence du PET dans un mélange avec une grande proportion montre sa vulnérabilité à la dégradation thermique et contribue à l'augmentation de son indice de fluidité. Cela explique que l'introduction de PEHD dans la matrice de PET pour des proportions inférieures à 20% n'influence presque pas le comportement du PET, et pour des proportions supérieures, nous constatons de légères différences.

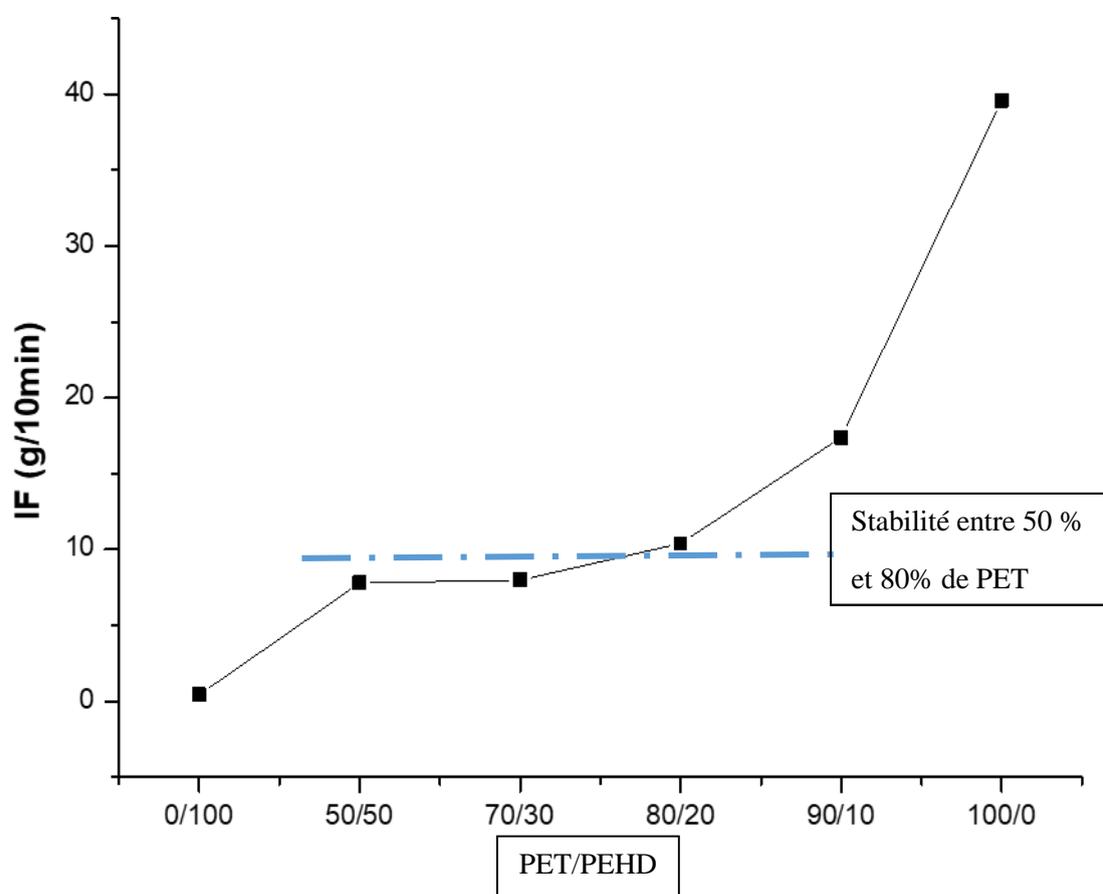


Figure IV.3 : Variations de l'indice de fluidité (IF) du système (PET/PEHD) -R en fonction des taux de PETr.

Tableau IV.1 : Résultats de mesure de l'indice de fluidité (IF)

Les Mélanges (PET/PEHD) -R %	m1	m2	m3	m4	m5	Moyennes (g)	IF(g/10min)
0/100	0.27	0.25	0.25	0.24	0.24	0.25	0.43
50/50	0.62	0.69	0.61	0.69	0.62	0.65	7.8
70/30	0.24	0.22	0.25	0.25	0.24	0.24	8
80/20	0.25	0.29	0.22	0.26	0.3	0.26	10.4
90/10	0.32	0.33	0.22	0.26	0.3	0.29	17.4
100/0	0.23	0.32	0.36	0.45	0.27	0.33	39.6

IV.3 Résultats de l'essai de choc

Les variations de la résistance au choc, PETr et des mélanges (PET/PEHD) –R sont représentées par les **figures IV.4 et tableau IV.2** :

La **figure IV.4** donne les variations de la résilience des échantillons PETr et des mélanges (PET/PEHD) -R préparés en absence d'un compatibilisant montre clairement que la résilience augmente en fonction du taux de PEHDr jusqu'à 30%, puis on observe une diminution progressive jusqu'à 50%.

D'après ces résultats, on constate que la meilleure proportion de PEHDr et celle de mélange (70%/30%) avec un taux de résistance au choc le plus élevé due à la présence de nodules allongés dans le sens de l'écoulement dans ce mélange, suivant de celle de mélange (50%/50%) qui résiste bien aussi, mais moins par rapport au mélange (70%/30%), cela due à la dispersion de nodule plus fine du PET dans la matrice ce qui fait diminuer la résistance au choc.

D'après le **tableau IV.2** représente les différents phénomènes de rupture des éprouvettes après l'essai de choc, commençons par l'éprouvettes de PETr (100%/0%), on observe une rupture brutale de type fragile elle se casse totalement en deux morceaux à cause de rigidité de PET qui est élevé.

Et pour l'éprouvette de mélange (90 %/10%), on remarque une rupture brutale de type fragile, qui veut dire que l'ajout de PEHD à 10% n'influence pas sur les propriétés de mélange.

Par contre, pour l'éprouvette de mélange (80%/20%) on observe une rupture qui a consommé 0.03 (J) de plus, qui révèle une légère influence de proportion PEHD. Pour le mélange (70%/30%) on observe une fissuration sans rupture, l'ajouts de PEHD a permis d'augmenter la viscosité, cela facilite l'extrusion de mélange ce qui a amélioré les propriétés mécaniques. L'éprouvette de mélange (50%/50%) présente une fissuration sans rupture, mais une légère diminution en résistance au choc, elle a consommé moins d'énergie comparant au mélange (70%/30%).

- **Dimension de l'éprouvettes :**

Epaisseur : 2 mm

Largeur : 12 mm

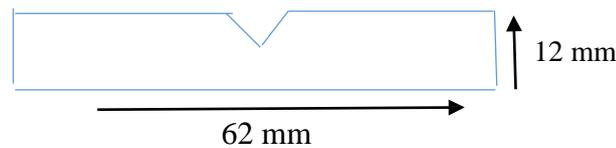
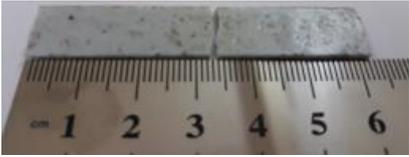
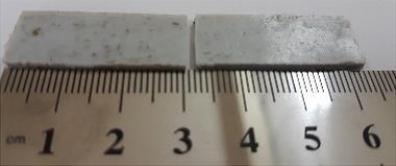
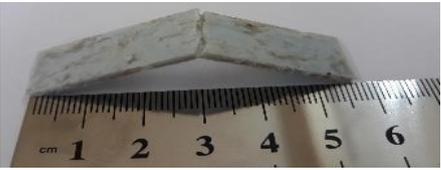
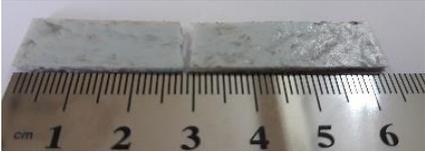
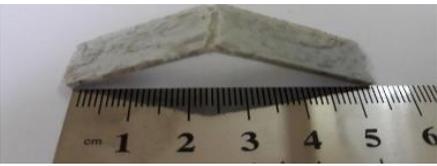


Tableau IV.2 : Les différents phénomènes de rupture des éprouvettes après l'essai de choc.

Mélange	Essai	Grad°	Grad° consommé	Illustration lors de l'essai	Energie (J)
PET 100/0	Essai 1	27	1		0.016
	Essai 2	27	1		0.016
	Essai 3	27	1		0.016
	Essai 1	27	1		0.016

90/10	Essai 2	27	1		0.016
	Essai 3	26	2		0.03
80/20	Essai 1	25	3		0.05
	Essai 2	25	3		0.05
	Essai 3	25	3		0.05
70/30	Essai 1	18	10		0.16
	Essai 2	20	8		0.13

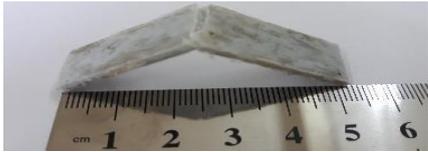
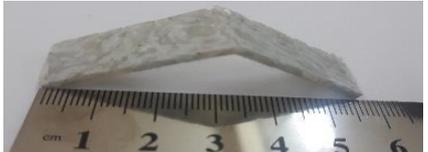
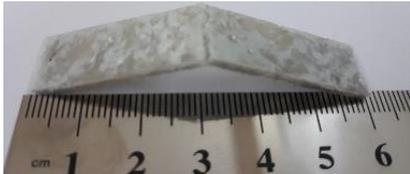
	Essai 3	17	11		0.18
50/50	Essai 1	20	8		0.13
	Essai 2	23	5		0.08
	Essai 3	21	7		0.11

Tableau IV.3 : Résultats d'essai de choc (résilience)

Mélange (PEHD/PET) -R	Résilience(J/mm ²).10 ⁻³
0/100	0.66
10/90	0.83
20/80	2.08
30/70	6.67
50/50	5.58

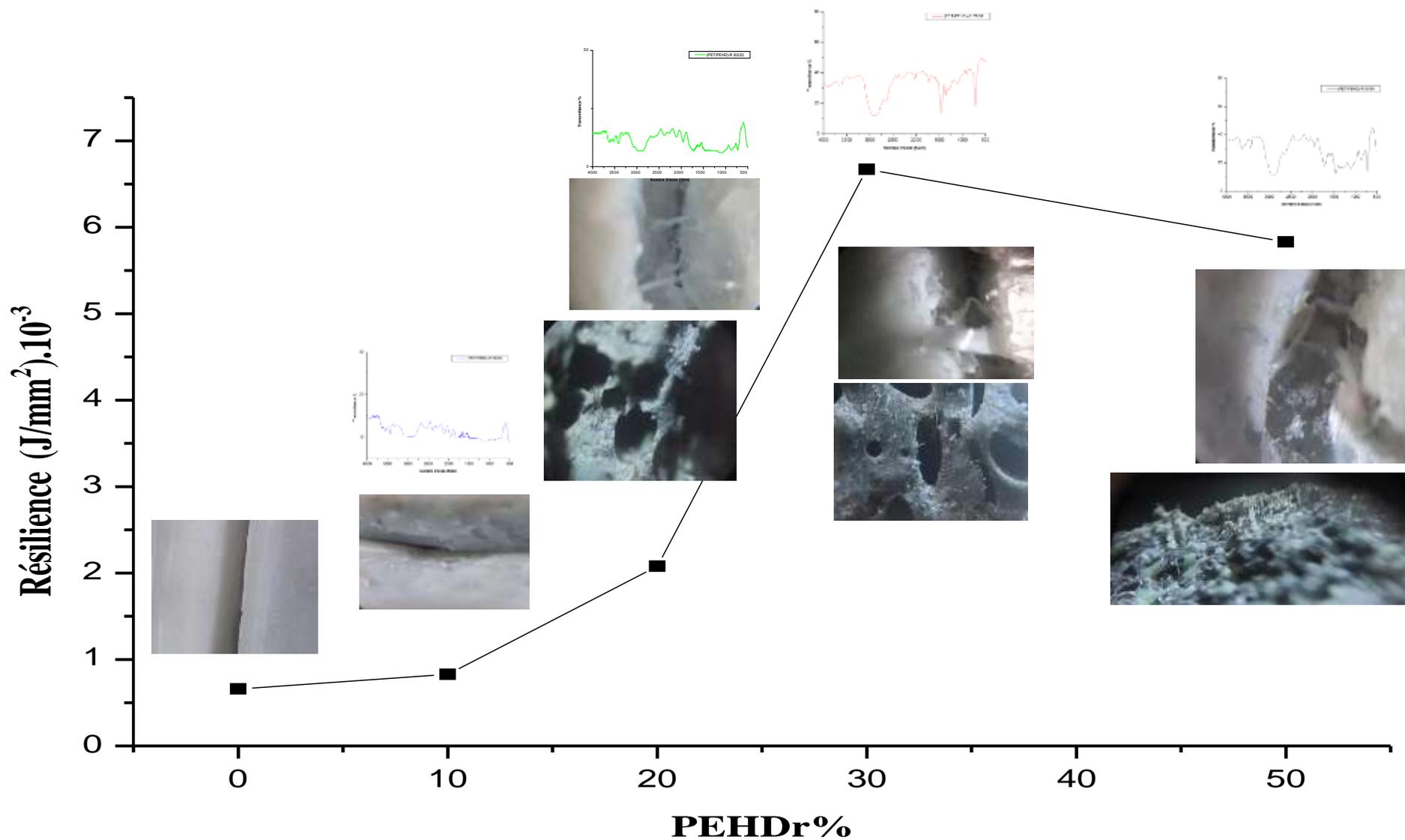


Figure IV.4 : variations de la résilience des mélanges (PET/PEHD) -R en fonction des taux de PEHDr.

IV.4 Etude morphologique du système PETr, PETrC et de mélange (PET/PEHD) -R faites à l'Université et l'industrie

Contrairement à la spectroscopie IRTF, l'analyse des échantillons des mélanges compresser sans compatibilisant par la microscopie électronique a permis d'acquérir des informations très utiles sur l'évolution des échanges dans le système PET/PEHD.

La **figure IV.5** la microphotographie des échantillons PETr (a) et PETrC (b). nous montrent une surface relativement lisse avec la présence de fils qui sont des longues chaînes moléculaires.

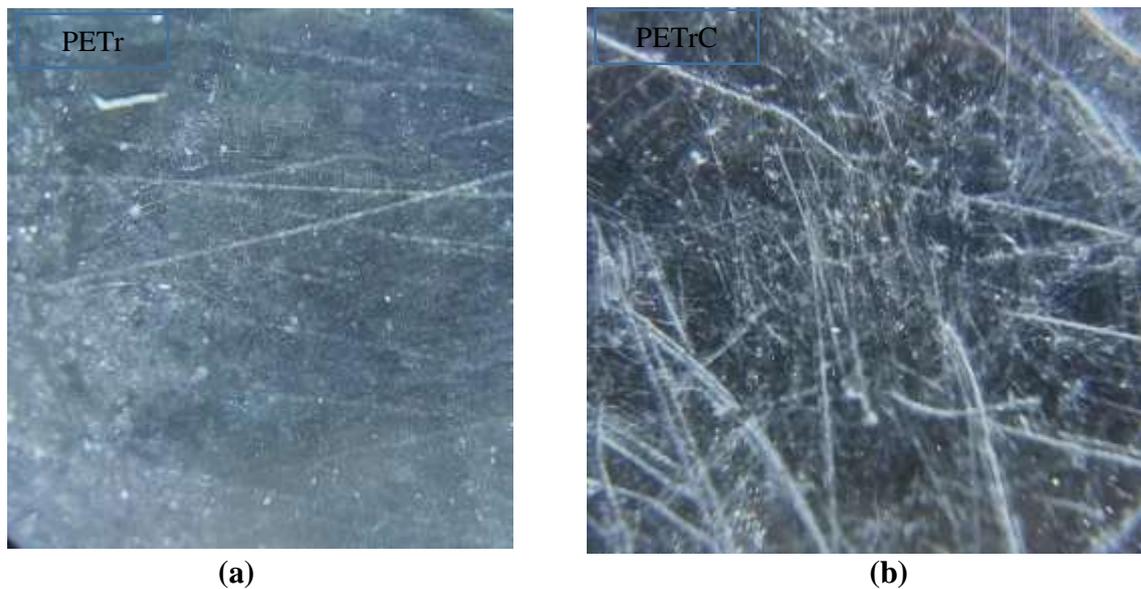


Figure IV.5 : La microphotographie des échantillons PETr (a) et PETrC (b).

La **figure IV.6** représente la microphotographie d'un échantillon du mélange PETr/PEHD_r (100%/0%) nous montre clairement la fissure sous la forme d'une "vague", reflétant la progression du front de fissure. Nous ne voyons pas les granulés révéler les impuretés de notre PET recyclé. De plus, de nombreuses ondes de fracture sont distribuées perpendiculairement à la direction de la force. Nous avons observé un comportement fragile du matériau.

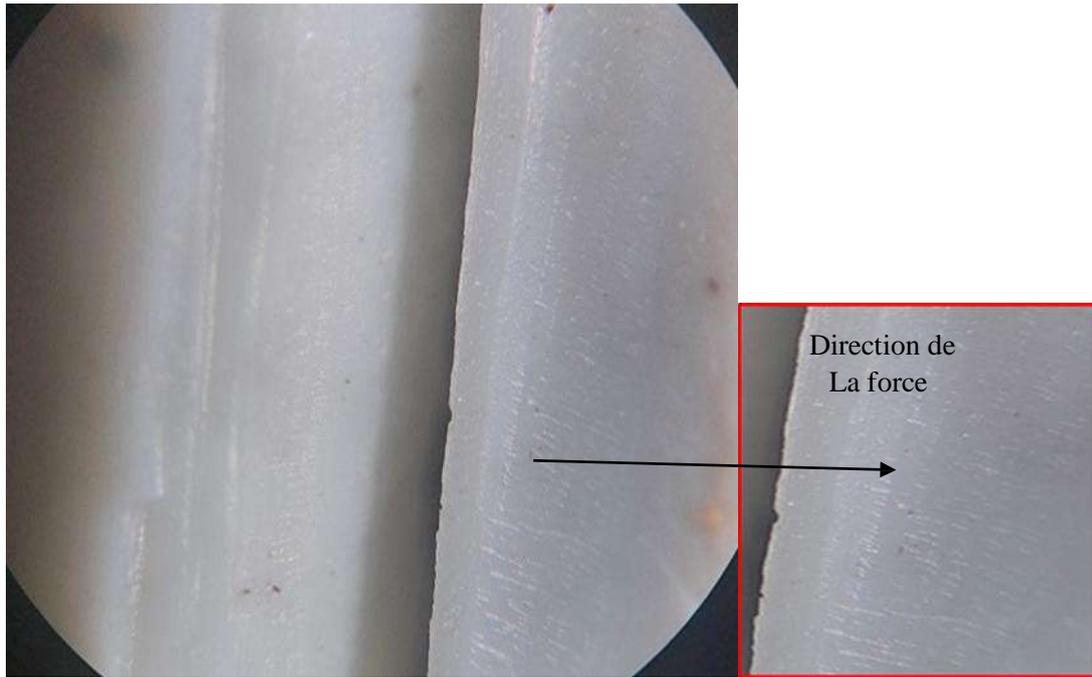


Figure IV.6 : Faciès de la fracture d'une éprouvette de mélange(100%PETr/0%PEHDr) après la résilience.

La figure IV.7 représente la microphotographie d'un échantillon du mélange PETr/PEHDr (90%/10%) nous montre sur la périphérie la présence des nodules de PEHD et des cavités nettes liée à une rupture interfaciale, ce qui confirme une faible force interfaciale entre la matrice PET et les nodules PEHD ce qui fragilise l'échantillon, et la présence des séries de vague de fracture au sens de la force. En progressant vers le centre, on remarque des vagues structurer de plus en plus sous forme des petites plaques, aussi l'augmentation de concentration des nodules qui ne semblent pas allongées ou déformées qui veulent dire l'écoulement de la matière au centre de l'échantillon n'influence pas sur nodules.



Figure IV.7 : la fracture d'une éprouvette du mélange (90%PETr/10%PEHDr)

D'après la **figure IV.8** et la **Figure IV.9** nous constatons une structure à la périphérie, identique à celle observée dans le cas du mélange 90%/10%. On observe de nombreuses vagues dues à la fracture, En progressant vers le centre on a une structure morcelée une augmentation de la concentration des nodules PEHD et des cavités allongées dans le sens de l'écoulement de la matière donc il y a bien une orientation des nodules de petites tailles.



Figure IV.8: la fracture d'une éprouvette du mélange (80%PETr/20%PEHDr)

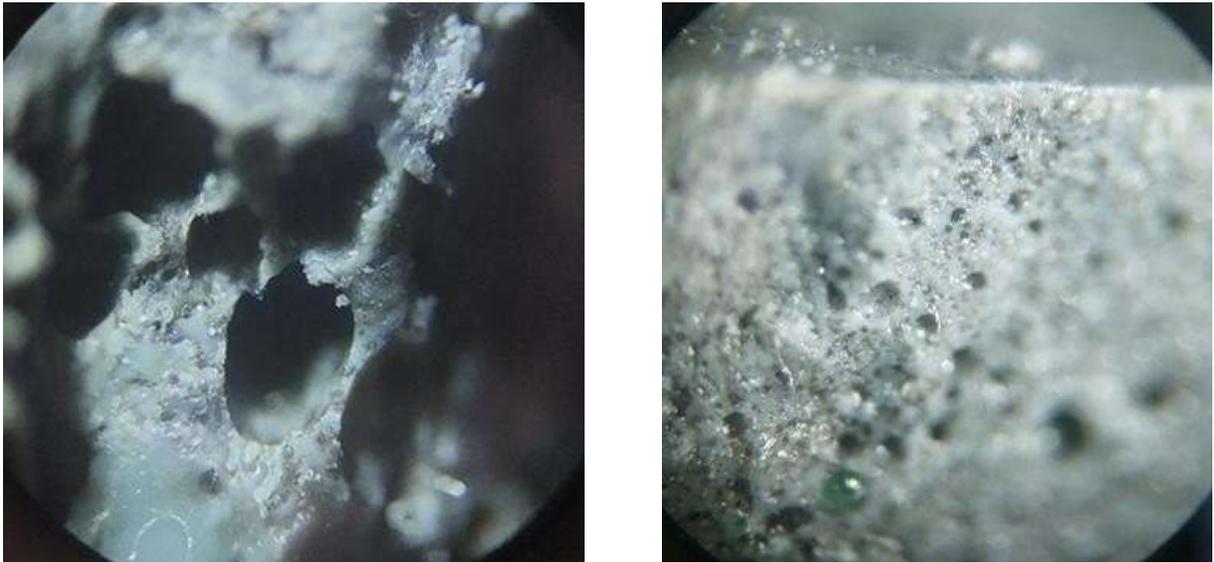


Figure IV.9 : la fracture d'une éprouvette du mélange industriel (80%PETr/20%PEHDr)

D'après la **figure IV.10** l'observation de phase fracturée de l'échantillon du mélange 70%/30% a révélé une structure interne complètement différente de celle observée précédemment. Il s'agit d'une structure dite « en feuille », Le nombre et la distribution en taille des nodules en PEHD ont fortement augmenté. Cependant, la présence directe de nodules allongés et de structures internes orientées est toujours frappante. Le mélange 70/30 est organisé en une série d'écailles cylindriques, au moins à la périphérie de l'échantillon. Ainsi, on observe des surfaces hétérogènes où les vagues de matière se succèdent. Plus aucun nodule n'est distingué mais de nombreux filaments sont présents par intermittence. Ces filaments pourraient provenir de nodules de PEhd fortement déformés, cependant une forte orientation dans la forme des nodules est observée au cœur de l'échantillon.

On aperçoit des trous bien clairs dans la **figure IV.11** ce qui explique la formation de ces structures par la coalescence entre différents feuillets, plus le rapport de fraction volumique se rapproche de 1, plus l'épaisseur des feuillets diminue et l'influence des forces interfaciales devient non négligeable. Elles conduisent à la formation de trous.

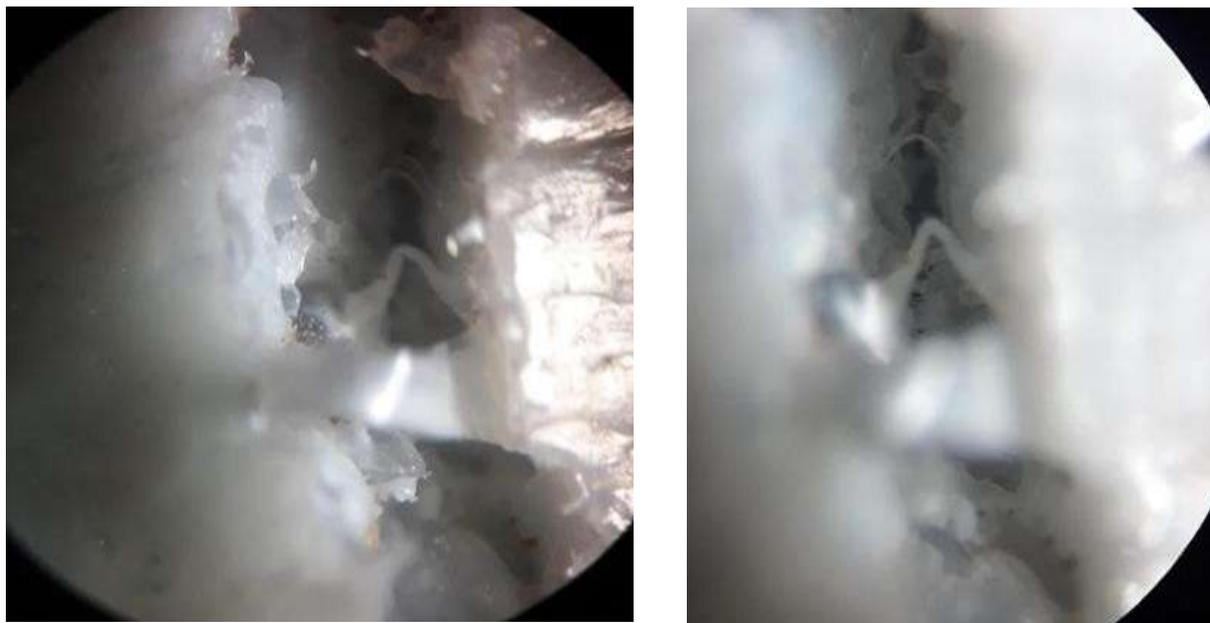


Figure IV.10: la fracture d'une éprouvette de mélange (70%PETr/30%PEHDr)



Figure IV.11: la fracture d'une éprouvette de mélange industriel (70%PETr/30%PEHDr)

Les photographies suivantes dans la **Figure IV.12** et la **Figure IV.13**, l'observation de phase fracturée de l'échantillon du mélange 50%/50% a révélé une morphologie typique de mélange incompatible, comprenant des domaines discrets du composant discontinu et des cratères et des vides laissés lorsque les particules attachées uniquement par une faible adhérence mécanique ont été retirées lors de la fracture. On observe la présence directe de gros nodules allongés et de structure internes orientées.

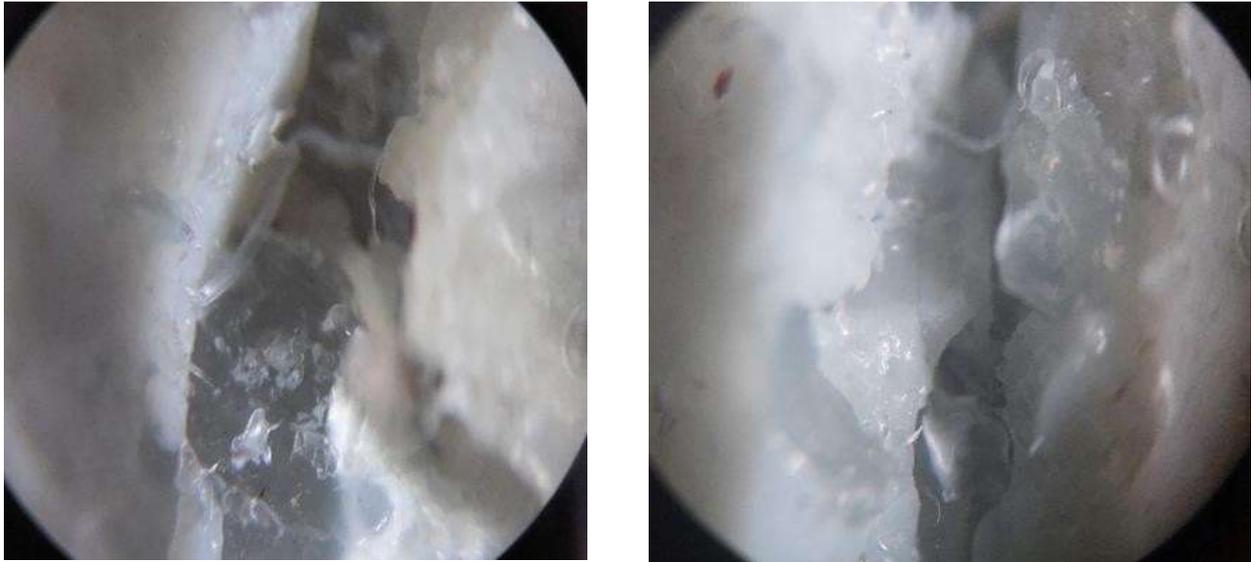


Figure IV.12 : la fracture d'une éprouvette de mélange (50% PETr/50% PEHDr).

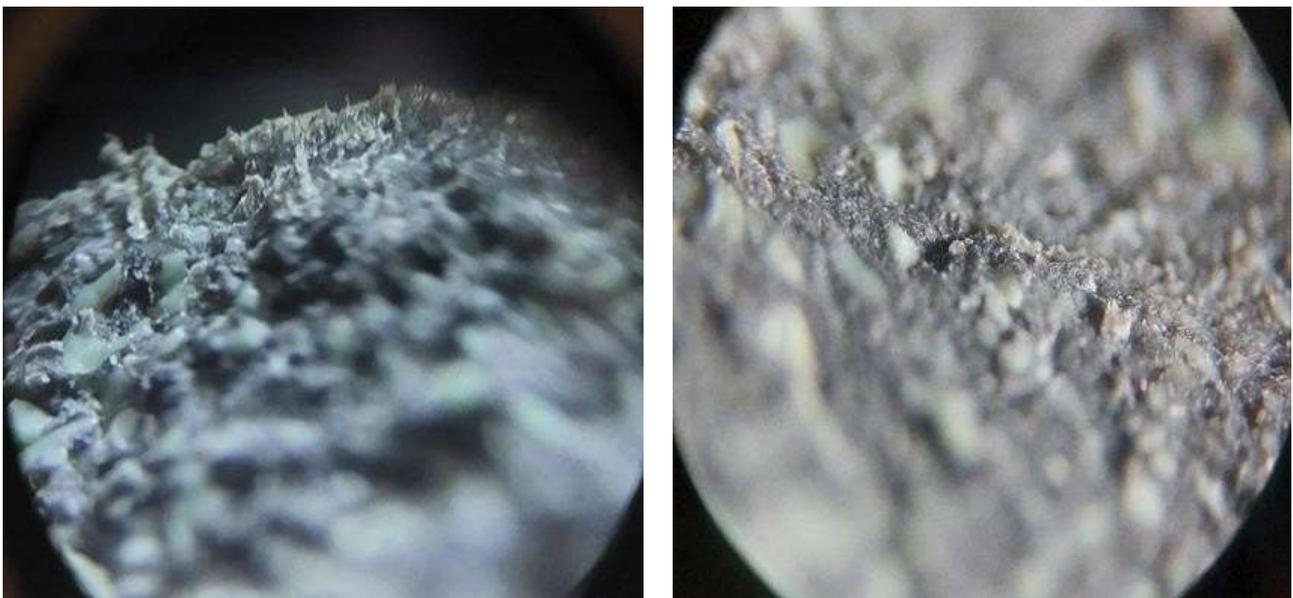


Figure IV.13: la fracture d'une éprouvette de mélange industriel (70% PETr/30% PEHDr).

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le recyclage du plastique reste un domaine très vaste vu la complexité d'élaboration de la matière première et des phénomènes des mélanges lors de la refonte et du malaxage des déchets issus de produits divers et hétérogène.

Ce travail nous a permis de travailler dans ce domaine afin de contribuer à l'amélioration du recyclage du plastique dans notre région qui reste non maîtrisé par les industriels travaillant dans ce domaine.

Nous nous sommes intéressés au fait de mélanger le PETr et le PEHDr qui sont deux polymères très divergents, en termes de méthode de recyclage et en termes de résistance mécanique du produit final.

Le produit final après mélange semble avoir des comportements très différents en fonction du taux du PEHDr ajouté aux matériaux de base qui est le PET, les essais de résilience (résistance aux chocs), l'analyse microstructurale et les spectres infrarouge, nous ont aidé à avoir les conclusions suivantes :

- A des taux inférieurs à 30% de PEHDr, les échantillons semblent fragiles, et ont les mêmes comportements du PETr seul qui est facile à recycler, mais donne des produits qui ne résistent pas aux chocs.

- Le taux de PEHDr améliore la résistance au choc des échantillons dépassant les 30%.

- Les microstructures des mélanges montrent clairement l'aspect de la rupture ductile dû à la présence du PEHDr, ou on voit les fibres de ces derniers tenir les deux parties des éprouvettes, donnant ainsi une forte liaison et donc une meilleure résistance aux chocs.

- Le mélange PET/PEHD est difficile à obtenir, mais semble une nécessité pour donner des produits recyclés de bonne qualité.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] <https://www.plastalger.com/fr/>
- [2] A ,SEYNI , Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par Co-broyage, thèse, université de Toulouse, France, (2008).
- [3] P. Weiss , La chimie des polymères, Support de Cours,(2010).
- [4] A. Ram , Fundamentals of polymer engineering, Ed. Plenum Press, Chapter 1, 1-3 (1997).
- [5]http://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/mansouri_naima/files/chapitre_i_structure_des_polymeres_et_leurs_classifications.pdf
- [6] http://mms2.ensmp.fr/mat_paris/elaboration/polycop/Ch_4_Elab_Polymeres.pdf
- [7] D.HAMMICHE, Cours de Matériaux Polymériques et Composites, Université Abderrahmane Mira, Bejaia,(2021).
- [8] N LADACI, Effet de vieillissement et analyse des mécanismes du comportement mécaniques et tribologique d'un PEHD, Université Guelma, p17 (2015).
- [9] N. KERBOUA, Etude de recyclage de déchets de polyéthylène téréphtalate (PET) utilisé pour la fabrication de bouteilles (eaux minérales), thèse doctorat en Génie des Procédés de l'Université A-Mira Bejaia, Algérie, (2010).
- [10] Preparation of Graphitic Oxide; 1957; Vol. 208. <https://doi.org/10.1021/ja01539a017>.
- [11] J.Chen, B.Yao, C.Li, G. Shi . An Improved Hummers Method for Eco-Friendly Synthesis of Graphene Oxide. Carbon N. Y, 64 (June 2015), 225–229, (2013).
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.07.055>.
- [12] L. Gouissem, Etude de l'effet des paramètres de transformation et des extenseurs de chaînes sur les propriétés du poly (éthylène téréphtalate) (PET) recyclé, thèse de doctorat université Ferhat Abbas Sétif 1, Algérie, 145p (2015).
- [13] P.Y. Pennarun, Migration à partir de bouteilles en PET recyclé. Elaboration et valorisation d'un modèle applicable aux barrières fonctionnelles, thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne-France, 281p (2001).
- [14] O. Zaki, Contribution à l'étude et à la modélisation de l'influence des phénomènes de transferts de masse sur le comportement mécanique de flacons en polypropylène, thèse de doctorat, université Paris-Est, France, 192p (2008).
- [15] F. Awaja , D. Pavel, Statistical models for optimization of properties of bottles produced using blends of reactive extruded recycled PET and virgin PET, European Polymer Journal, Vol. 41, 2097 (2005).

- [16] K.L. NAÏT-ALI, « le PET recyclé en emballages alimentaires: Approche expérimentale et modélisation, Thèse de doctorat en Chimie des Matériaux », Univ Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc, France, p 8 (2008).
- [17] Le Polytéraphthalate d'éthylène PET - Ramène tes sciences, en ligne (consulté 13 avril)
- [18] K. B. Nicole, A.H. Marc, « Post-polymerization functionalization of polyolefins», Chemical Society Reviews, Vol. 34, pp. 267-275, (2005).
- [19] L. DOUMINGE, « étude du comportement du polyéthylène haute densité sous irradiation ultraviolette ou sollicitation mécanique par spectroscopie de fluorescence » thèse de doctorat, université de la rochelle, (2010).
- [20] A. Barlow, «The chemistry of polyethylene insulation», IEEE, Electrical Insulation Magazine, Vol. 7, N° 1, pp. 8-19, (1991)
- [21] U.H. Nilsson, R.C. Dammert, A. Campus, A. Sneck, H. J. Jansson, “Morphology of polyethylene for power cable insulation: effects of antioxidant and crosslinking”, IEEE, International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, pp. 365-367, Vasteras Sweden, (1998).
- [22] M. Fontanille, Y. Gnanou, JL Six ; Chimie et Physico-chimie Des Polymères(cours), écoles d'ingénieurs., Nouvelle présentation 2005. Dunod, Paris, (2002).
- [23] M. Bouterfa Etude de la détermination du paramètre d'interaction entre deux polymères par voie mécanique effet du comptabilisant sur ce paramètre , Magister , univ-setif,(2011).
- [24] Les applications du HDPE, Groupe PolyAlto, en ligne (consulté 4 mai 2022).
- [25] H. Zhang, Z. G. Wena, « The consumption and recycling collection system of PET bottles: A case study of Beijing », China, Waste Management, p. 1–12(2013).
- [26] Plastics the fact 2021 <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/>
- [27] Rapport plastique <https://and.dz/site/wp-content/uploads/RapportPlastique.pdf> (consulté 4 avril 2022).
- [28] Notede Synthèse Plastiques FINALE.pdf , en ligne (consulté 20 avril 2022). <https://ged.fne.asso.fr/silverpeas/LinkFile/Key/b75218e9-e1e5-46ba-9d6aee7b534a346e/Note%20de%20Synth%C3%A8se%20Plastiques%20FINALE.pdf>
- [29] ECOEMBALLAGES. « Etude des perspectives d'évolution du tri par couleur du verre d'emballage en France ». [en ligne]. Disponible sur : < www.ecoemballages.fr >.
- [30] N. Bellili, «Etude des effets du recyclage sur les propriétés mécaniques, thermiques et rhéologiques du PET ».Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbes- Sétif, p72 (2006).
- [31] HDPE and PP recycling , en ligne (consulté le 20 avril 2022), disponible sur le site http://sorema.it/fr_FR/applications/hdpe-and-pp-recycling/

- [32] C. Dutriez, Corrélations entre les propriétés diélectriques et mécaniques des Polymères ; influence de la température, thèse de doctorat, Ecole doctorale des Matériaux de Lyon-France, 166p (2004).
- [33] K. L. Nait-Ali, Le PET recyclé en emballages alimentaires : approche expérimentale et modélisation, thèse de doctorat, université Montpellier II, France, 221p (2008).
- [34] N. Noroozi, L. Schafer, G. Hatzikiriakos, Polymer Engineering and Science, 2348,(2012).
- [35] L. Bénédicte, M. Dvalckenaere, N. Pantousitier, M. Alexandre, D.Kubies, C. Calberge, R. Jérôme, P. Dubois, Polymer, 43, 4017, (2002).
- [36] H. Tsuji, Y. Ikada, Journal of Applied Polymer Science, 60, 2367, (1996).
- [37] N. Mnif, Elaboration et caractérisation de mélanges complexes à base de polypropylène en vue de son éco-conception et de son recyclage dans les véhicules hors d'usage, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 193p (2008).
- [38] F.Khalil, Mélanges de polymères biodégradables immiscibles : Influence de la morphologie sur le contrôle de la libération de substances actives ou modèles , thèse de doctorat , (2015).
- [39] M. Guessoum ,Contribution à L'étude des effets des réactions de transésterification en présence d'un titanate sur les propriétés du système PC/PET, thèse de doctorat, Université Frehat Abbas Sétif-1, Algérie,6p (2007).
- [40] S. Boufassa, Nanocomposites à base de système polymères / Renfort de structure lamellaire : Conséquences des interactions sur la morphologie et les propriétés physicochimiques des matériaux, thèse de doctorat, Université Frehat Abbas Sétif-1, Algérie, 194p (2015).
- [41] V. Chaffraix, Etude de l'extrusion du polyéthylène téréphtalate et de ses mélanges non-compatibilisés avec le polyéthylène haute densité application au recyclage, thèse de doctorat, Ecole des mines de Paris, France, p(55,62) (2002).
- [42] P.V.S. PRASAD, Packaging material of new millenium , in The Economic Times Polymers, volume 1, pp. 8-17, (2000).
- [43] F. AWAJA, D. PAVEL, Recycling of PET , in European Polymer Journal, volume 41, pp. 1453-1477, (2005).
- [44] KL. Nait-Ali,Le PET recyclé en emballages alimentaires: approche expérimentale et modélisation, thèse de doctorat, p42, (2008).
- [45] Point de fusion , http://www.verre-et-cristal.com/point_de_fusion.php .

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation et du recyclage mécanique des déchets de polyéthylène téréphtalate (PET) qui constitue un gisement abondant en raison de son emploi dans le secteur de l'emballage du fait de leur utilisation dans l'industrie de l'emballage. Le polymère est thermoplastique. Cependant, en raison de sa faible viscosité, son "extrudabilité" est faible, et nous avons décidé de le mélanger avec du polyéthylène haute densité (PEHD). L'enjeu de nos travaux est donc de trouver des solutions pour extruder le PET et ses mélanges sous forme de profils puis compresser sous forme d'éprouvette, tout en veillant à ce que le matériau extrudé ait de bonnes propriétés mécaniques.

Nous avons montré que le taux de PEHD améliore la résistance au choc des échantillons dépassant les 30%, et que la microstructure des mélanges en présence de PEHD donne ainsi une forte liaison et donc une meilleure résistance aux chocs.

Mot clés : Mélanges (PET/PEHD)-R, résilience

Abstract

This study is part of the recovery and mechanical recycling of polyethylene terephthalate (PET) waste, which is an abundant source due to its use in the packaging industry. The polymer is thermoplastic. However, due to its low viscosity, its "extrudability" is low, and we decided to mix it with high density polyethylene (HDPE). The challenge of our work is therefore to find solutions to extrude PET and its mixtures in the form of profiles and then to compress them in the form of a test piece, while ensuring that the extruded material has good mechanical properties.

We have shown that the HDPE content improves the impact resistance of the samples above 30%, and that the microstructure of the blends in the presence of HDPE gives a strong bond and thus a better impact resistance.

Key words : (PET/HDPE) blends, impact strength