

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Ecole Nationale Polytechnique**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

**Département Génie Chimique**

**Mémoire de Master  
en Génie Chimique**

**Thème**

**Le recyclage des polymères**

**Etudié par :**  
HARIZI Intissar

**Proposé et dirigé par :**  
Dr MEFTI Afia

Soutenu le 13 Juin 2015, devant le jury suivant :

<b>Président :</b>	Pr. A. SELATNIA	Professeur, ENP
<b>Examinatrices :</b>	Dr F.MOHELLEBI	Maitre de conférences A, ENP
	Mme Y. TCHOULAK	Maitre assistante A, ENP
<b>Rapporteur :</b>	Dr A. MEFTI	Maitre de conférences A, ENP

**PROMOTION 2015**

## « إعادة تدوير المواد المصنوعة من البوليمر »

### ملخص

الغرض من هذا العمل هو عرض الوسائل المختلفة المستخدمة من أجل تئمين النفايات البلاستيكية، مع التطرق الى مختلف مراحل وأنواع إعادة تدوير هذه النفايات. غزت البوليمرات حياتنا اليومية، وذلك أساسا في شكل بلاستيك. إنتاج هذه المواد في تزايد مستمر مما يسبب الكثير من المشاكل البيئية بعد تحولها الى نفايات. توجد العديد من الطرق من أجل تئمين النفايات البلاستيكية والتي يمكن تصنيفها الى أربعة أنماط من إعادة التدوير. تواجه إعادة تدوير البلاستيك العديد من الصعوبات خلال مراحل جمع وفصل النفايات المختلطة، وذلك لأن البوليمرات غير متوافقة مع بعضها البعض مما يؤدي إلى منتجات ذات خصائص متردية. تعد طريقة تئمين النفايات البلاستيكية في شكل مزيج من البلاستيك او مواد مركبة احدي الحلول من أجل تحسين خصائص المنتجات المعاد تدويرها.

**الكلمات المفتاحية:** بوليمير، بلاستيك، نفايات، تئمين، إعادة تدوير.

## « Le recyclage des polymères »

### Résumé

Le but de ce travail est de présenter les différentes voies de valorisation des déchets plastiques, les types et les étapes de recyclage de ces matériaux.

Les polymères ont envahi notre vie quotidienne, principalement sous forme de matières plastiques. La production de ces dernières, ne cesse de croître ce qui pose de véritables problèmes environnementaux. Différentes méthodes de valorisation sont utilisées pour traiter ces flux de déchets et peuvent être rassemblées en quatre modes de recyclages. Le recyclage présente des difficultés majeures au niveau de la collecte et de la séparation des déchets plastiques à cause de l'immiscibilité des polymères

La valorisation en mélanges et en matériaux composites, constituent l'une des solutions pour affronter à ces difficultés et améliorer les propriétés des produits recyclés.

**Mots clés :** polymère, plastique, déchet, recyclage, valorisation.

## «Polymers recycling»

### Abstract

The purpose of this work is to present the different recovery methods of waste plastics, the stages and types of recycling of these materials.

The polymers have invaded our daily lives, mainly in form of plastics. The production of these materials continues to grow, which poses real environmental problems. Different recovery methods are used to deal with waste streams; they can be grouped into four modes of recycling. Recycling presents major difficulties in the collection and separation of waste plastics, because polymers are incompatible with each other which leads to products of bad properties.

Recovery of plastics wastes as mixtures and nanocomposites are one of the solutions to ameliorate the properties of recycled products. Compatibilizers can be used to improve the compatibility between polymers.

**Key words:** polymer, plastic, waste, recycling, recovery.

## REMERCIEMENTS

J'aimerais en premier lieu remercier le bon Dieu, Allah, tout puissant, de m'avoir donné la force, la volonté, le courage et la patience pour dépasser toutes les difficultés et accomplir ce travail.

Je tiens à remercier infiniment Mme A. MEFTI, ma directrice de mémoire, pour tout le soutien, l'aide, l'orientation, la guidance qu'elle m'a apportés, ainsi que pour ses précieux conseils et ses encouragements lors de la réalisation de mon mémoire.

Je remercie plus particulièrement mes enseignants : Pr. A. SELATNIA de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury. Mme F. MOHELLEBI et Mme Y. TCHOULAK d'avoir accepté d'être membres du jury et de juger mon travail avec leurs colossaux backgrounds.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents, Abdelhafid et Nora, qui ont toujours été là pour moi, « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevables d'une éducation dont je suis fiers ».

Enfin, je remercie mes amis et camarades de promotion pour ces années passées ensemble, dans les meilleurs moments comme dans les pires.

## DEDICACES

Nous dédions ce modeste travail à nos très chers parents, Abdelhafid et Nora qui ont été pour nous les meilleurs apports pendant toute la vie.

A ma chère sœur Rofaida.

A mes chers Zaki, Sohaib et Taissir.

A toute la famille HARIZI et BENMIROUH.

A ma chère grand-mère.

Ma tante Soumia.

A tous mes amis et mes camarades.

**Intissar**

# TABLE DES MATIERES

RESUME.....	II
REMERCIEMENTS.....	III
DEDICACES.....	IV
LISTE DES FIGURES.....	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	X
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>

## Chapitre I : GENERALITES

I.1	Définition de polymère.....	5
I.2	Origine des polymères.....	5
I.2.1	Polymères naturels.....	5
I.2.2	Polymères artificiels.....	5
I.2.3	Polymères synthétiques.....	6
I.3	Types de polymères.....	6
I.3.1	Selon leur importance économique.....	6
I.3.1.1	Polymères de grande diffusion.....	6
I.3.1.2	Polymères spéciaux.....	7
I.3.1.3	Polymères techniques.....	7
I.3.2	Selon leur utilisation.....	7
I.3.2.1	Elastomères.....	7
I.3.2.2	Fibres.....	7
I.3.2.3	Plastiques.....	8
I.4	Matières plastiques.....	8
I.4.1	Définition de matériau plastique.....	8
I.4.2	Types de plastiques.....	8
I.4.2.1	Les thermoplastiques.....	9
I.4.2.1	Les thermodurcissables.....	10

I.4.3	Propriétés et avantages des plastiques .....	11
-------	--	----

## **Chapitre II : MATIERES PLASTIQUES : PRODUITS ET DECHETS**

II.1	Domaines d'application des polymères .....	14
II.1.1	Emballage.....	14
II.1.2	Bâtiment et construction .....	14
II.1.3	Transport .....	14
II.1.4	Electricité et électronique.....	15
II.1.5	Médecine.....	15
II.2	L'évolution de la production des matières plastiques.....	15
II.3	Déchets plastiques.....	17
II.3.1	Définition d'un déchet .....	17
II.3.2	Principaux gisements des déchets plastiques .....	17
II.3.2.1.	Déchets industriels .....	17
II.3.2.2.	Déchets de post-consommation .....	18
II.3.3	Principaux types de polymères trouvés dans les déchets plastiques .....	19
II.3.4	Modes de traitement des déchets plastiques .....	20
II.3.4.1.	Elimination des déchets.....	21
II.3.4.3.	Valorisation matière .....	21
II.3.4.3.	Valorisation énergétique.....	21
II.3.5	Matières plastiques et risques pour l'environnement et la santé .....	21

## **Chapitre III : RECYCLAGE DES DECHETS PLASTIQUES**

III.1.	Définition de recyclage .....	24
III.2.	Statistiques sur le recyclage .....	24
III.3.	Etapas de recyclage des déchets plastiques .....	24
III.3.1	Collecte .....	25
III.3.2	Séparation.....	25
III.3.2.1	Séparation par fluide supercritique .....	25
III.3.2.2	La classification hydraulique/pneumatique.....	25
III.3.2.3	Tri électrostatique .....	26
III.3.3.	Traitement.....	27
III.3.3.1	Recyclage primaire .....	28
III.3.3.2	Recyclage mécanique (recyclage secondaire) .....	28
III.3.3.3	Recyclage Chimique (recyclage tertiaire) .....	28

III.3.3.4	Récupération d'énergie .....	29
III.4.	Limitations des procédés de recyclage des polymères .....	30
III.4.1	Collecte des déchets.....	30
III.4.2	Séparations des mélanges de plastiques .....	30
III.4.3	Vieillissement des polymères .....	30
III.5	Procédés d'élimination des déchets en cours de développement .....	30
III.5.1	Procédé de biodégradation .....	31
III.5.2	Procédé photodégradation.....	31
III.6	Solutions et perspectives	
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>		<b>32</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>		<b>35</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1 :</b> Schémas représentatifs des structures du thermoplastique et du thermodurcissable .....	10
<b>Figure II.1 :</b> Comparaison des productions de plastiques, d'acier et d'aluminium de 1970 à 2006.....	15
<b>Figure II.2 :</b> Répartition de production de plastiques entre les principaux secteurs (2006).....	16
<b>Figure II.3 :</b> Histogramme des pourcentages de production mondiale des différents types de polymères en 2007 .....	16
<b>Figure II.4 :</b> Répartition des divers types de matières plastiques dans les emballages ménagers (France 2002).....	18
<b>Figure II. 5 :</b> Modes de valorisation des déchets de matières plastiques contenues dans les ordures ménagères .....	21
<b>Figure III.1 :</b> Principe de flottation – décantation.....	26
<b>Figure III.2 :</b> Schéma de principe de l'hydrocyclone. ....	26
<b>Figure III.3 :</b> Schéma du principe de séparateur à Air-Knife. ....	26
<b>Figure III.4 :</b> Schéma du séparateur à zig-zag. ....	26
<b>Figure III.5:</b> Séparateur de déchets par tri électrostatique.....	27
<b>Figure III.6 :</b> Schéma de différentes techniques de recyclage d'un déchet plastique. ....	27

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I. 1 :</b> Classifications des polymères selon différents critères.....	6
<b>Tableau I. 2 :</b> Propriétés et utilisations de différentes familles des thermoplastiques.....	9
<b>Tableau I. 3 :</b> Propriétés et utilisations de quelques familles des thermodurcissables .....	10
<b>Tableau I. 4 :</b> Avantages et inconvénients de quelques polymères .....	11
<b>Tableau II.1 :</b> Durées de vie et utilisations des différents types de polymères trouvés dans les déchets. ....	19

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

<b>ABS</b>	Acrylonitrile Butadiène Styrène
<b>BTP</b>	Bâtiments et travaux publics
<b>PE</b>	Polyéthylène
<b>PEbd</b>	Polyéthylène basse densité
<b>PEhd</b>	Polyéthylène haute densité
<b>PET</b>	Polyéthylène téréphtalate
<b>PMMA</b>	Polyméthylméthacrylate
<b>PP</b>	Polypropylène
<b>UV</b>	Ultraviolet

# **INTRODUCTION GENERALE**

Les polymères jouent un rôle très important dans la vie humaine. En effet, notre corps est fait de beaucoup de polymères : protéines, enzymes .... Les polymères naturels comme le bois, le caoutchouc, le cuir et la soie sont au service de l'humanité depuis des siècles. Les outils scientifiques modernes permettent de développer le traitement des polymères et arriver à une grande diversité de polymères synthétiques comme les plastiques, les caoutchoucs utiles et les matières fibreuses. A cause de leur variété, il existe différentes manières de les classer. Les polymères occupent une place importante dans l'industrie, il serait impossible d'énumérer leurs applications multiples et variées. On les retrouve dans toutes les activités industrielles dont l'emballage est en première place. Les matières plastiques couvrent une gamme très étendue de matériaux polymères. On peut observer aujourd'hui sur un même matériau des propriétés qui n'avaient jamais auparavant été réunies. La production et consommation des matériaux plastiques ne cessent de croître, une croissance qui s'explique par les avantages qu'offrent ces matériaux : faible densité, coût peu élevé; performances élevés; facilité de mise en œuvre...

Malgré ses applications positives, le plastique pose un véritable problème. En effet, une augmentation de sa consommation implique un plus grand nombre de déchets inévitables en fin de vie des produits plastiques, ce qui est nuisible pour l'homme et l'environnement. En plus de la pollution visuelle que les plastiques provoquent, ils persistent pendant des centaines d'années en contaminant *les écosystèmes*. *Plusieurs méthodes de gestion de ces déchets sont utilisées afin de les réduire, les valoriser ou les éliminer*. Les plus connues de ces méthodes sont la mise en décharges ou l'incinération. L'élimination des déchets à la décharge devient indésirable à cause des législations et de la faible biodégradabilité des polymères ; la récupération de la chaleur par la méthode d'incinération, en plus de sa faible efficacité, s'accompagne avec la production des gaz toxiques. Donc, si elle est bien maîtrisée, la valorisation des déchets par recyclage mécanique ou chimique semble être la meilleure solution pour une bonne gestion des déchets.

Dans ce travail, le premier chapitre sera consacré à quelques généralités sur les polymères en présentant en bref, leurs origines, classification selon différents critères, en mettant l'accent sur les matériaux plastiques qui constituent une vaste gamme des polymères. Ensuite, le deuxième chapitre présentera quelques domaines d'utilisation des polymères, l'évolution de la production et la consommation des plastiques et donc nombre des déchets produits. Les gisements de déchets de matières plastiques sont relativement nombreux, il

s'agit principalement des déchets industriels et de post-consommation. En plus de l'enfouissement et l'incinération sans récupération d'énergie, deux modes de valorisation peuvent être utilisés: la valorisation de la matière par recyclage, mécanique ou chimique, qui sera abordé dans le dernier chapitre, et une valorisation énergétique principalement par incinération. Nous terminerons ce chapitre par les risques que posent ces méthodes sur la santé humaine ainsi que sur l'environnement, la faune et la flore.

Dans le dernier chapitre, nous allons nous intéresser au recyclage des déchets plastiques, ses étapes et ses différents types, problèmes confrontés, solutions et perspectives pour l'amélioration des propriétés des produits.

Enfin, des méthodes d'élimination des déchets au cours de développement seront présentées avant de citer quelques solutions et perspectives pour faire face aux problèmes rencontrés, visant l'amélioration des propriétés en essayant de gagner, même en partie, ce qui a été détruit.

En résumé, en plus, des quatre types de recyclage présentés, on trouve la réutilisation et le réemploi considérés comme recyclage d'ordre zéro. Bien que le recyclage mécanique et le recyclage chimique semblent être les bons choix, ils présentent des limites au niveau de la collecte des déchets plastiques et, principalement, au niveau de la séparation à cause de l'immiscibilité entre les polymères.

**Chapitre I :**  
**GENERALITES**

La science macromoléculaire a eu un impact majeur sur la façon dont nous vivons (1). Dès les premiers temps, l'homme a exploité des polymères d'origine naturelle pour en faire des vêtements, de la décoration, des abris, des outils, des armes, du matériel d'écriture et d'autres objets. Cependant, l'origine de l'industrie des polymères d'aujourd'hui est communément admise comme étant le XIX<sup>e</sup> siècle, lorsque des découvertes importantes ont été faites concernant la modification de certains polymères naturels. (2)

L'étude systématique de la science des polymères a commencé il y a seulement environ un siècle avec le travail innovant d'Herman Staudinger qui a publié pour la première fois, en 1919, le concept selon lequel les composés de masse moléculaire élevée sont composés de molécules longues liées par des liaisons covalentes. (2)

## **I.1 Définition de polymère**

Qu'appelle-t-on polymère ? Plusieurs réponses peuvent être données, mais la définition la plus généralement acceptée est celle d'un système formé par un ensemble de macromolécules, c'est-à-dire d'entités moléculaires de grande dimension, issues de l'assemblage covalent d'un grand nombre d'unités répétitives plus communément appelées unités (ou motifs) monomères (3). Ces derniers diffèrent d'un polymère à l'autre et déterminent en grande partie les propriétés du produit fini. (4)

## **I.2 Origine des polymères (3)(5)**

Les polymères peuvent être d'origines diverses : naturelle, artificielle ou synthétique.

### **I.2.1 Polymères naturels**

Les polymères, qui sont produits dans la nature sont appelés polymères naturels, aussi connu comme biopolymères. Ils sont issus des règnes végétal ou animal et ont une importance considérable. On peut mentionner dans cette catégorie : le caoutchouc naturel, la soie naturelle, la cellulose, l'amidon, et les protéines.

### **I.2.2 Polymères artificiels**

Sont obtenus par modification chimique de polymères naturels, de façon à transformer certaines de leurs propriétés, ils ont connu une certaine importance économique. L'ester cellulosique est un exemple de cette catégorie.

### I.2.3 Polymères synthétiques

Totalement issus du génie de l'homme, synthétisés au niveau des laboratoires et obtenus par polymérisation de molécules monomères. On trouve dans cette famille : les plastiques, les élastomères...

## I.3 Types de polymères

Polymère est un nom donné à un grand nombre de matières. Ces matériaux existent sous d'innombrables formes en raison du très grand nombre et types d'atomes présents dans leurs molécules. Ils ont des structures, des propriétés chimiques, physiques, comportement mécanique et des caractéristiques thermiques différentes. Sur la base de ces critères les polymères peuvent être classés de différentes manières, résumées dans le tableau I.1. (6)

**Tableau I.1** : Classifications des polymères selon différents critères. (6)

Critère de classification	Types de polymère
Propriétés thermiques	Thermoplastique, thermodurcissable, élastomère.
Structure des chaînes	Linéaire, réticulé, ramifié.
Application	caoutchouc, plastique, fibres.
Cristallinité	Non cristallin (amorphe), semi-cristallin, cristallin.
Polarité	Polaire, non polaire.
Types de monomères	Homopolymère, copolymère.
Mode de synthèse	Polymérisât, polycondensat.
Importance économique	Grande diffusion, technique, haute performance.

La classification selon leur importance économique et selon l'utilisation seront détaillés dans les paragraphes suivants.

### I.3.1 Selon leur importance économique (3)

Il est possible de regrouper les polymères suivant leur importance économique en trois grandes catégories :

#### I.3.1.1 Polymères de grande diffusion

Encore appelés polymères de commodité, dont la production annuelle s'évalue en millions de tonnes, le volume des ventes est élevé et le prix est faible, ils sont devenus d'un emploi

quotidien pour tous. Citant comme exemple : Polyéthylène (PE), polypropylène (PP), polystyrène (PS), polychlorure de vinyle (PVC).

### **I.3.1.2 Polymères spéciaux**

Présentent généralement une propriété qui induit leur utilisation pour une application particulière, le volume des ventes est le plus faible et les prix sont les plus élevés, C'est dans cette catégorie que se trouvent les polymères conducteurs, les photo-actifs, les thermostables, les adhésifs ...

### **I.3.1.3 Polymères techniques**

Leur volume et leur prix sont intermédiaires entre les deux autres catégories. Ils ont des caractéristiques qui leur permettent de se substituer, de plus en plus, aux matériaux traditionnels (métaux, céramiques...) pour de nombreuses applications ; les polyamides, les polyacétals font partie de cette famille.

## **I.3.2 Selon leur utilisation (6)**

En fonction de leurs formes ultimes et utilisations les polymères peuvent être classés en élastomères, fibres et plastiques.

### **I.3.2.1 Elastomères :**

Aussi connu par les caoutchoucs, ce sont des polymères avec de longues chaînes flexibles et de forces intermoléculaires faibles, caractérisés par sa grande élasticité qui leur permet de subir un allongement important (de 300 – 1000%) sous charge, à la température ambiante, et de retour à leur forme initiale lorsque la charge est libérée grâce aux quelques réticulations introduites entre les chaînes (5). Des exemples de cette classe sont : le caoutchouc naturel, Buna-S, Buna-N, néoprène, polyisoprène synthétique ... (7)

### **I.3.2.2 Fibres**

Les fibres sont des polymères à longue chaîne, formant des fils solides caractérisés par des régions hautement cristallines résultant principalement de forces secondaires. Ils ont une élasticité beaucoup plus faible que les plastiques et les élastomères. Ces caractéristiques peuvent être attribuées à des forces intermoléculaires fortes comme la liaison hydrogène, ils sont légers et possèdent des propriétés d'absorption d'humidité. Utilisés dans les industries textiles.

### I.3.2.3 Plastiques

Les plastiques sont des substances relativement rigides, à haut poids moléculaire qui peuvent être moulés par l'application de chaleur. Ils sont généralement beaucoup plus résistants que les caoutchoucs. Ils présentent un allongement à la rupture allant généralement de 20 à 200%. (7)

Dans tous ce qui suit nous allons nous s'intéresser principalement à ces matériaux.

## I.4 Matières plastiques

### I.4.1 Définition de matériau plastique

Le terme «plastique» est dérivé du mot grec ancien « plasticos » signifiant « pâteux » relatif au modelage plastique, désigne communément une famille, toujours plus nombreuse, de produits ou matières organiques de synthèse contenant comme ingrédient essentiel un polymère. [ISO 472, novembre1999]

Ils sont fabriqués selon un processus chimique de synthèse et sont transformés en matériaux utilisables par le biais du façonnage plastique.(8)

### I.4.2 Types de plastiques

Du point de vue des comportements thermiques, les plastiques peuvent être classés en matières thermoplastiques et matières thermodurcissables. (9)

#### I.4.2.1 Les thermoplastiques

Sont constitués de polymères essentiellement linéaires ou branchés. Le long de ses chaînes les atomes sont fortement liés entre eux par des liaisons fortes appelées covalentes, mais entre les chaînes il existe des liaisons beaucoup plus faibles qui assurent la cohésion du matériau. Toutefois lorsqu'on augmente la température, les macromolécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres qui se traduit par un ramollissement ou la fusion du matériau thermoplastique. Ces matériaux peuvent se ramollir à plusieurs reprises sans beaucoup de changement dans leurs propriétés, ce qui les rend facilement **recyclables**. Des exemples de ces plastiques sont : PEhb, PEbd, PVC ... .(10)

Le tableau I.2 présente quelques propriétés et exemples d'utilisations des principales familles des thermoplastiques.

**Tableau I.2 :** Quelques propriétés et utilisations de différentes familles des thermoplastiques. (10)

<b>Famille du thermoplastique</b>	<b>Propriétés</b>	<b>Utilisation</b>
Acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS)	Ténacité, résistance à la déformation à chaud; bonnes propriétés électriques ; inflammable et soluble dans certains solvants organiques.	Doublure de réfrigérateur, pelouse et équipements des jardins, jouets, appareils de la sécurité routière.
Polyamides (nylon)	Bonne résistance mécanique, résistance à l'abrasion, et de ténacité; faible coefficient de friction; absorber l'eau et d'autres liquides.	Roulements, engrenages, cames, bagues, bougies, gainage de fils et de câbles.
Polycarbonates	stabilité dimensionnelle: faible absorption de l'eau; transparent, bonne résistance aux chocs et ductilité.	Casques de sécurité, lentilles globes lumineux, base pour film photographique.
Polyéthylène	Bonne résistance chimique et isolation électrique, une mauvaise résistance aux intempéries.	Bouteilles flexibles, jouets, gobelets, parties de batterie, bacs à glaçons, emballage en film.
Polypropylène	Bonne résistance à la chaleur de distorsion et à la fatigue; excellentes propriétés électriques, chimiquement inerte; peu coûteux; une faible résistance aux rayons UV.	Bouteilles stérilisables, films d'emballage, meubles TV, bagages.
Polystyrène	Excellentes propriétés électriques et clarté optique ; une bonne stabilité thermique et dimensionnelle; relativement peu coûteux.	Carrelage mural, boîtiers de batterie, jouets, panneaux d'éclairage intérieur, boîtiers d'appareils.
Polyester (PET ou PETE)	Grande dureté; excellente fatigue et résistance à la déchirure, résistance aux acides et de l'humidité, des graisses, des huiles et des solvants.	Bandes magnétiques d'enregistrement, vêtements, cordes de pneus automobiles, bouteilles de boissons gazeuses, conteneurs.

### I.4.2.2 Les thermodurcissables

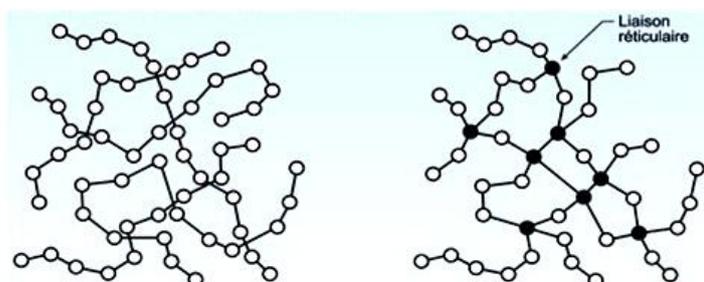
Des matériaux formés à partir de molécules trifonctionnelles ou obtenues par pontage, ils ont une structure moléculaire tridimensionnelle, la réaction de réticulation qui permet de les obtenir est en général favorisée par le chauffage d'où le nom thermodurcissables. Lorsqu'ils sont chauffés au-delà d'une certaine température, ils durcissent de façon irréversible, ils sont aussi appelés thermodurs.(10)

Ces matériaux ne sont pas susceptibles de se ramollir ou de fondre. Par conséquent, les techniques de recyclage applicables aux thermoplastiques ne pourront être employées.

Un chauffage trop important conduit à la destruction plus ou moins importante du matériau polymère. (10)(11)

**Tableau I.3:** propriétés et utilisation de quelques familles de thermodurcissables. (12)(13)

Famille du thermodurcissable	Propriétés	Utilisation
Polyépoxydes	Excellentes propriétés mécaniques, bonne résistance à la corrosion, indéformable, bonne adhérence, relativement peu coûteux, bonnes propriétés électriques.	Moules électriques, éviers, adhésifs, revêtements de protection, utilisés avec des stratifiés de fibre de verre.
Phénoliques	Excellente stabilité thermique à plus de 150° C, peut être mélangé avec un grand nombre de résines, des charges..., peu coûteux.	Boîtier de moteur, téléphones, distributeurs d'automobiles, appareils électriques.



**Figure I.1 :** Schémas représentatifs des structures du thermoplastique et du thermodurcissable.(81)

a) thermoplastique.      b) thermodurcissable.

### I.4.3 Propriétés et avantages des plastiques

Les plastiques sont des matériaux importants pour de nombreuses raisons. Ils ont une large gamme de propriétés, dont certaines sont inaccessibles à partir de tout autre matériau, et dans la plupart des cas, ils sont relativement peu coûteux(14). La plupart des propriétés des polymères sont intrinsèques et changent d'un polymère à un autre, ce qui fait que chaque plastique est adapté pour une utilisation spécifique. Généralement ils sont caractérisés par un poids léger, une faible conductivité thermique et électrique, une bonne ténacité, une bonne résistance aux acides, bases, à l'humidité et à la corrosion, haute résistance diélectrique, et une grande élasticité (15). Grâce aux leurs propriétés et leur fabrication peu coûteuse les plastiques sont très fonctionnels et leur développement ne cesse de croître.(16)(17)

Le tableau I.4 résume l'ensemble des avantages et inconvénients des plus importantes matières plastiques utilisées.

**Tableau I.4 :** Avantages et inconvénients de quelques polymères.

Principales résines plastiques	Avantages	Inconvénients
PET	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Très transparent</li> <li>- Bonne résistance mécanique</li> <li>- Peu perméable aux gaz (bouteille)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prix élevé</li> </ul>
PEhd	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le moins cher et le plus produit</li> <li>- Léger</li> <li>- Résiste aux températures de congélation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forte perméabilité aux gaz et à la vapeur d'eau</li> </ul>
PVC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transparent</li> <li>- Bonne résistance à l'humidité</li> <li>- Peu perméable aux gaz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Polluant (de plus en plus remplacé par le PET pour le conditionnement des eaux minérales)</li> </ul>

PEbd	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bon marché</li> <li>- Souple</li> <li>- Imperméable à l'humidité</li> <li>- Excellente résistance chimique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible résistance en UV</li> <li>- Haute perméabilité aux gaz (notamment CO<sub>2</sub>)</li> <li>- Basse température maximale d'exploitation</li> <li>- Inflammable</li> </ul>
PP	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le plus léger des matières plastiques</li> <li>- Transparent</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perméabilité aux gaz et à la vapeur d'eau</li> </ul>
PS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Economique</li> <li>- Transparent</li> <li>-Peut être coloré</li> <li>- Large gamme d'utilisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilement dégradable</li> <li>- Non renouvelable</li> <li>- Impact sur la santé en cas de chauffage surtout.</li> </ul>

Des substances étrangères appelées additifs sont introduites intentionnellement pour améliorer ou modifier certaines propriétés des plastiques : résistance à la traction, compression et abrasion, flexibilité, ductilité, ténacité... ; Ceux-ci comprennent des charges, des plastifiants, des stabilisants, des colorants et des agents ignifuges.... (18)

**Chapitre II :**

**MATIERES PLASTIQUES : PRODUITS ET  
DECHETS**

Après la seconde guerre mondiale, les plastiques s'épanouirent comme des matériaux omniprésents, non seulement dans la construction ou la production industrielle, mais dans tous les secteurs de l'économie et de la vie quotidienne. Cette nouvelle technologie ouvrit alors la société de consommation. (1)

Les polymères forment une classe très importante de matériaux sans lesquels la vie semble très difficile. Ils sont tout autour de nous dans l'usage quotidien; en caoutchouc, en plastique, dans les fibres...

## **II.1 Domaines d'application des polymères (20)(21)**

Destinés à répondre aux besoins d'une application donnée, entre autres, les plastiques sont de plus en plus utilisés dans les domaines suivants :

### **II.1.1 Emballage**

Les plastiques font des matières d'emballage idéales pour toutes sortes d'utilisateurs commerciaux et industriels. Ils sont essentiels pour traiter, stocker, transporter, protéger et conserver des produits. Le secteur des emballages est le plus gros consommateur de plastique : Plus de 50 % de toutes les marchandises en Europe sont emballées dans du plastique.

### **II.1.2 Bâtiment et construction**

Les plastiques ne sont pas toujours visibles dans le secteur du bâtiment et de la construction, mais ils sont néanmoins indispensables! Cette industrie utilise des plastiques pour l'isolation à la tuyauterie, des châssis de fenêtres à l'aménagement intérieur... La popularité continue des plastiques dans ce secteur est due à leur durabilité, faible coût et l'esthétique de leur finition. Ce secteur vient après l'emballage en termes de consommations des plastiques.

### **II.1.3 Transport**

Dans ce secteur, le plastique est utilisé pour fabriquer des éléments de carrosserie, pièces mécaniques complexes, coussins, rembourrage... Il a permis, grâce à sa légèreté, d'économiser l'énergie en diminuant la consommation des carburants, par les automobiles, et les émissions du CO<sub>2</sub>.

### II.1.4 Electricité et électronique

Les plastiques sont indispensables dans les applications électriques et électroniques. Des simples câbles, des appareils ménagers aux téléphones mobiles et aux lecteurs DVD, des parties importantes de tous les équipements modernes sont en plastique.

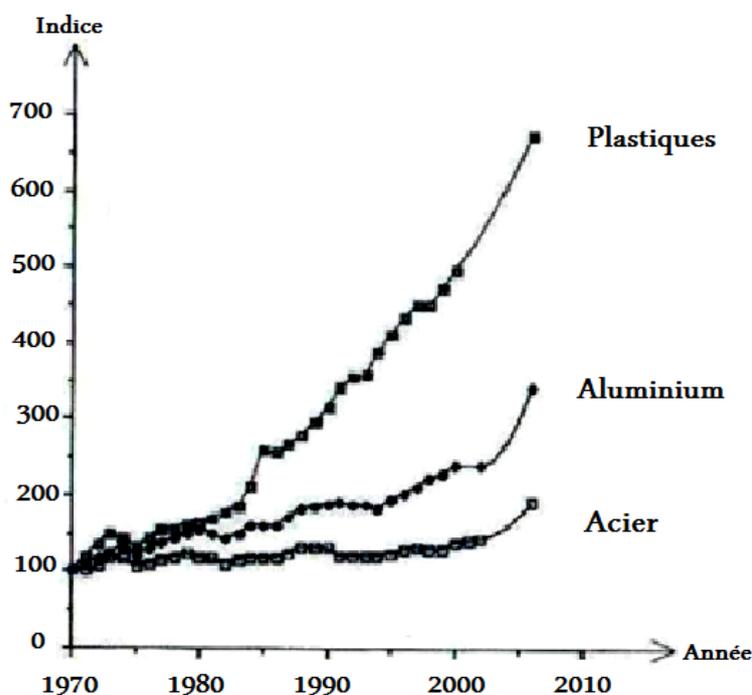
### II.1.5 Médecine

Les soins médicaux modernes seraient impossibles sans de nombreux produits médicaux en plastique auxquels on ne fait plus attention : les seringues jetables, les poches de sang et les valves cardiaques. On utilise actuellement des plastiques dans des appareils orthopédiques : la paroi abdominale et les chevilles par exemple. Les prothèses en plastique peuvent remplacer une partie du corps, et assumer sa fonction principale. (21)

## II.2 L'évolution de la production des matières plastiques

Pendant les trente dernières années, la production mondiale de plastiques a augmenté de 400%, contre 40% pour l'acier et 140% pour l'aluminium.

La figure II.1 présente une comparaison entre la production de plastiques, d'acier et d'aluminium.

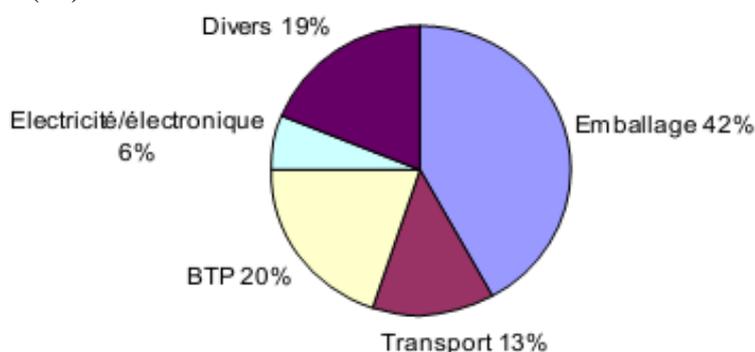


**Figure II. 1 :** Comparaison des productions mondiale de plastiques, d'acier et d'aluminium de 1970 à 2006. (24)

245 millions de tonnes de plastique avaient été produits dans le monde en 2008, selon la fédération des producteurs de plastique PlasticsEurope, contre 265 millions de tonnes en 2011 et 280 millions de tonnes en 2012, soit plus près de 8.90 kilos de plastique par seconde. (22)(23)

L'activité d'emballage représente environ le quart de la consommation des matières plastiques en volume, celle-ci a pris approximativement le quart du marché de l'emballage.

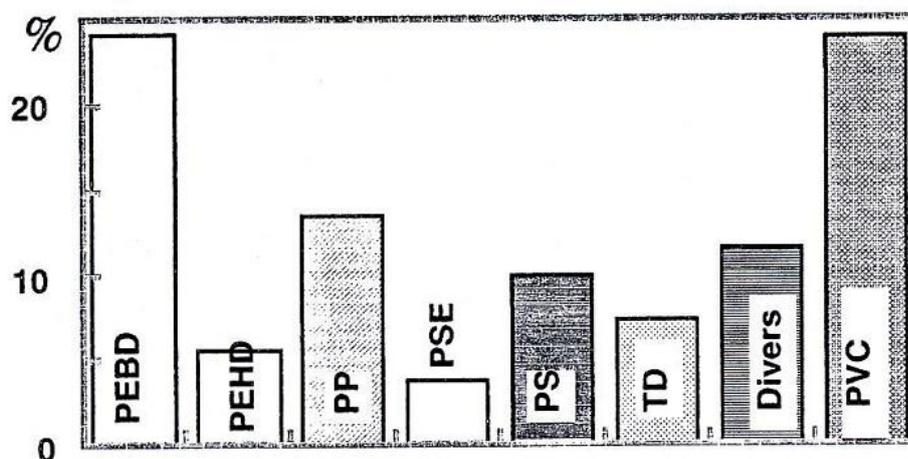
La répartition de production de plastiques entre les principaux secteurs est donnée dans la figure II.2 . Les Etats-Unis occupent la première place en produisant 30% de la production mondiale, puis viendra le Japon, l'Allemagne et la France avec respectivement 16%, 8% et 4%. (10)



**Figure II.2 :** Répartition de production de plastiques entre les principaux secteurs (2006). (10)

Nous constatons que l'emballage reste le premier domaine d'utilisation avec 42%, ce qui posera le problème de traitement des matières plastiques à la fin de leur cycle de vie.

La figure II.3 représente un histogramme des pourcentages de production mondiale des différents types de polymère en 2007. (25)



**Figure II.3 :** Histogramme des pourcentages de production mondiale des différents types de polymères en 2007. (25)

Les polymères les plus employés dans le secteur industriel sont le PE et le PVC détiennent 25% du marché, le PP et le PS 23 %. (25)

### **II.3 Déchets plastiques**

Au cours des dernières décennies, la forte augmentation de la population mondiale ainsi que la nécessité de personnes à adopter de meilleures conditions de vie ont conduit à une augmentation dramatique de la consommation de polymères (principalement des matières plastiques). Comme la durée de vie des déchets plastiques est très faible (environ 40% ont une durée de vie inférieure à un mois), ce vaste flux de déchets créent des graves problèmes environnementaux. (26)

#### **II.3.1 Définition d'un déchet**

On appelle déchet « tout résidu d'un processus de production, de transformation, toute substance, matériau ou, plus généralement, tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ». (27)

#### **II.3.2 Principaux gisement des déchets plastiques (28)**

Les gisements de déchets de matières plastiques sont relativement nombreux et on a pour habitude de les classer en fonction de l'application dont ils sont issus.

##### **II.3.2.1 Déchets industriels**

Dans cette catégorie est pris en compte l'ensemble des déchets de matières plastiques issus des processus de production des résines (synthèse des polymères, essentiellement au niveau des sites pétrochimiques) et de transformation des résines en objets finis (principalement au niveau de la filière de la plasturgie).

- **Déchets de production**

Ces déchets, majoritairement constitués de polymères de grande diffusion, proviennent de lots de matières correspondant à des arrêts de réacteurs de polymérisation, à des purges de réacteurs ou, encore, à des lots déclassés.

- **Déchets de transformation**

Ils sont produits lors de toutes les opérations de plasturgie permettant l'obtention de produits finis (extrusion, extrusion et injection, soufflage, calandrage...). Il s'agit de carottes, lisières, bordures de thermoformage, pièces présentant des défauts ou, encore, chutes de démarrage et d'arrêts de machine.

### II.3.2.2 Déchets de post-consommation

- **Déchets agricoles**

Les déchets de matières plastiques issus du monde agricole sont essentiellement constitués de films, sacs, liens, fûts et bidons de produits phytosanitaires. Pour l'essentiel, il s'agit de polyoléfines (PEhd, PEbd et PP).

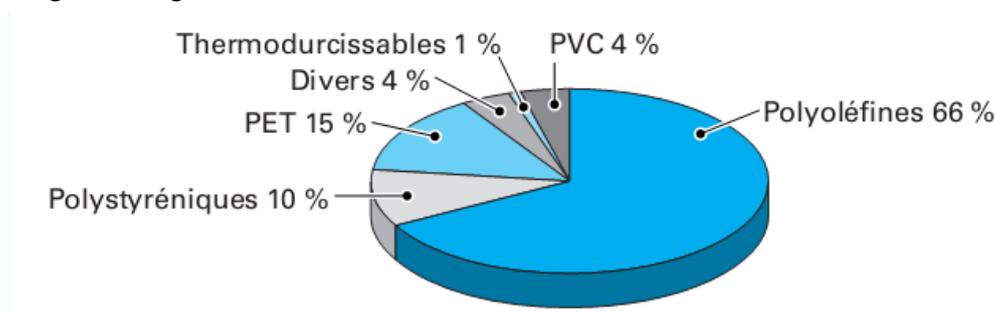
- **Déchets électriques et électroniques**

Il s'agit d'un gisement issu de la filière de tous les produits électriques et électroniques, tant au niveau des déchets de fabrication que des déchets d'équipements en fin de vie tels que des ordinateurs, téléphones, appareils électroménagers, câbles...

- **Déchets ménagers**

Les matières plastiques contenues dans les déchets des ménages se situent essentiellement au niveau des emballages.

La figure II.4 montre la répartition des divers types de matières plastiques dans les emballages ménagers.



**Figure II. 4 :** Répartition des divers types de matières plastiques dans les emballages ménagers (France 2002).(28)

- **Déchets des secteurs du bâtiment et des travaux publics**

Les déchets sont essentiellement constitués de films d'emballages, de déchets de démolition ou de réfection de l'habitat (profilés de fenêtres, tuyaux, conduits électriques, câbles, mousses d'isolation). Ces matériaux sont très fortement mélangés.

- **Déchets des véhicules de transport**

Ce gisement est principalement localisé au niveau des véhicules, hors d'usage (VHU). Les VHU subissent à la fin de leur vie une démolition dans divers types de sites. La fraction des plastiques et caoutchoucs contenue dans les VHU est très hétérogène selon les véhicules et leur âge (en moyenne 10 à 12 ans) et représenterait en moyenne 14 % en masse du véhicule.

### II.3.3 Principaux types de polymères trouvés dans les déchets plastiques

Les déchets plastique ont des origines diverses comme déjà vu. Les types de polymères qu'on trouve le plus souvent dans les déchets plastiques sont énumérés dans le tableau II.2. (29)(30)

**Tableau II.1:** Durées de vie et utilisations des différents types de polymères trouvés dans les déchets. (30)

Polymère	Utilisation	Durée de vie
PEhd	Emballages et films industriels, bouteilles, baignoires, tasses, jouets. Bidons, réservoirs, caisses pour le lait, isolation des câbles, tuyaux, jerricanes, conteneurs, bancs et sièges.	Quelques mois à quelques années (30 ans maximum)  1 à 2 ans
PEbd	Films d'emballage, films auto-adhésifs, sachets et sacs.  Couvercles, jouets, revêtements, conteneurs souples, canalisations.  Tuyaux d'arrosage	Quelques mois à quelques années (2 ans maximum) 5 ans maximum 20 ans maximum
PET	Bouteilles, films pour l'emballage de produits alimentaires, courroies, bandes d'enregistrement;  Tapis, cordes pour pneus d'automobiles, fibres	5mois - 5 ans maximum  2 ans 10 ans
PP	Pots de yaourts et de margarine, emballages pour bonbons et gourmandises, films d'emballage, bouteilles et capuchons ;  Bacs pour batteries d'automobiles, pièces détachées et prothèses, composants électriques  Poil et support de tapis.	10 ans maximum  15 ans ou Plus  5 ans maximum
PS	Application pour l'emballage, conteneurs de produits laitiers, tasses et assiettes ;  Matériels électriques, cassettes d'enregistrement.	1mois - 5 ans maximum  2 - 10 ans maximum

PVC	Garnitures et habillages de portes et fenêtres, conduites d'eau potable et tuyaux d'épuration, matériaux de construction façades de bâtiments, carrelages, isolation des câbles et fils	50 ans maximum
-----	---	----------------

Cinq grands types de plastique sont les plus constitutifs du volume de déchets municipaux en Europe. Ce sont: PEhd, PEbd, PP, PS, PET et le PVC (14). Outre le PET et le PVC, POM (polyoxyméthylène) sont également classés dans les déchets de plastique d'ingénierie.(31). Des études récentes ont montré que les polyoléfines, le PS, le PET et le PVC représentent 90% de la composition des rejets de plastique post-consommation. (32)

### II.3.4 Les modes de traitement des déchets plastiques (33)

Depuis toujours, mais surtout depuis le développement des civilisations urbaines, le problème des déchets s'est posé. Les déchets plastiques sont destinés soit à l'élimination soit à la valorisation.

Il existe différents types de valorisation des déchets plastiques tous dépend de type et volume des déchets. Chacun de ces modes présente des résultats distincts en termes de coûts/bénéfices économiques et environnementaux.

Deux grands modes de valorisation sont envisageables :

- Valorisation matière, par la récupération d'une partie importante de matière.
- Valorisation énergétique. par récupération d'énergie en utilisant le pouvoir calorifique de ces matériaux.

#### II.3.4.1 Elimination des déchets

- **Enfouissement contrôlé**

Ce moyen est la forme la plus aisée de se débarrasser de déchets. Il a cependant, l'inconvénient d'être ni esthétique, ni valorisant. (34)

- **Incineration sans récupération d'énergie**

C'est encore, pour le moment, la façon la plus efficace et la plus rapide pour faire disparaître les résidus urbains sans cesse croissants. Elle demeure, de plus, intéressante pour les petites collectivités. (34)

### II.3.4.2 La valorisation matière

- **Le recyclage**

C'est un processus de récupération et de traitement des déchets plastiques pour une réutilisation dans la fabrication de nouveaux produits plastiques ou pour obtenir des matières premières. (10)

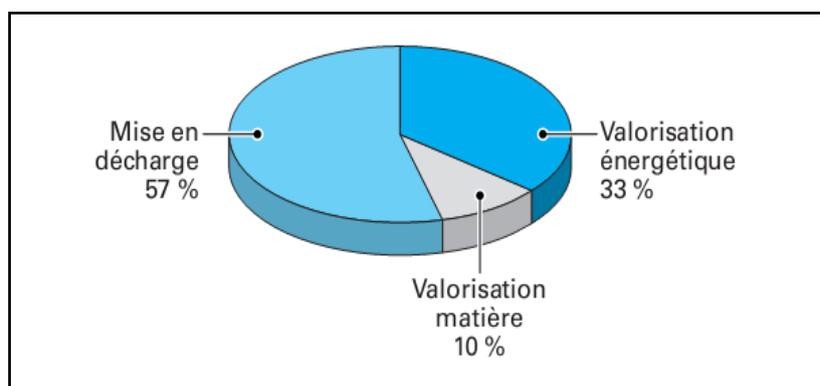
Deux méthodes de recyclage sont utilisées couramment, le recyclage mécanique et le recyclage chimique.(36).

Ce type de valorisation de matière sera détaillé dans le prochain chapitre.

### II.3.4.3 La valorisation énergétique

La valorisation énergétique fait par l'incinération des déchets permet de produire d'énergie sous forme de chaleur utilisée pour le chauffage ou régénération d'électricité(34)(37). En général, l'incinération des déchets plastiques permet une réduction de leur volume de 90% dans les décharges.

La figure II.5 présente les modes de valorisation des déchets de matières plastiques contenues dans les ordures ménagères à la France (2000).



**Figure II. 5 :** Modes de valorisation des déchets plastiques contenues dans les ordures ménagères.(28)

### II.3.5 Matières plastiques et risques pour l'environnement et la santé

Malgré leurs applications positives dans divers domaines, les matières plastiques peuvent poser des sérieux problèmes vis à vis de l'environnement et de la santé. En effet, la teneur des adjuvants et des monomères en quantité, plus au moins grandes, dans les

polymères présente le risque de réactions chimiques nocives pendant la fabrication et l'usage de ces matières notamment pour les produits alimentaires (24). Pendant la décomposition à haute température, ces matières génèrent des émissions de gaz, des solvants, des poussières et des rejets atmosphériques considérables.

Des masses considérables de déchets plastiques causeraient, en Europe, chaque année la mort de plus d'un million d'oiseaux et de plus de cent mille de mammifères marins. Toute la chaîne alimentaire, allant du poisson directement consommé par l'homme, serait affectée par l'existence des microparticules de plastiques. Par conséquent, la mise en place de stratégies efficaces de gestion des déchets est indispensable. (38)(24)

La production et l'usage des matières plastiques constituent un véritable défi en matière de promotion du développement durable. Ces matières plastiques réduisent, d'une part, les prélèvements sur les ressources naturelles, d'autre part, elles contribuent à détruire l'environnement par leurs déchets non biodégradables et la santé de l'homme (39). La mise en œuvre de stratégies efficaces de réduction déchets, est devenue indispensable afin de garantir un développement réellement durable.(39)

**Chapitre III :**

**RECYCLAGE DES DECHETS PLASTIQUES**

Actuellement, la plus commune méthode pour la manipulation des flux de déchets est la mise en décharge ou l'incinération pour la récupération d'énergie. L'élimination des déchets à la décharge devient indésirable en raison des législations plus en plus sévères et de la faible biodégradabilité des polymères couramment utilisés. (40)(41)

La récupération de la chaleur par la méthode d'incinération des déchets plastiques s'accompagne avec la production des gaz toxiques et les cendres de résidus qui contiennent du plomb et du cadmium. L'incinération, de point de vue économique, est une méthode à faible efficacité(31)(42). Par conséquent, le recyclage semble être la meilleure solution. (26)

### **III.1 Définition de recyclage**

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets basé sur des techniques de transformation des déchets après récupération. Il permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui composaient un produit similaire arrivé en fin de vie, ou des résidus de fabrication. (41) (43)

### **III.2 Statistiques sur le recyclage**

Sur le vaste spectre des résines synthétisées et utilisées, seul le polyéthylène, le polypropylène et le PET sont recyclés de manière directe en Amérique du Nord. Toutefois, le taux de réutilisation est relativement faible puisqu'il atteint aujourd'hui une valeur maximale de 30% pour des applications d'emballage (44). Le reste des résines est enfoui, incinéré ou exporté vers les pays d'Asie.

De manière générale, les polymères ne sont pas à la première place en terme de recyclage. En 2007, le recyclage de plastique vient en cinquième position avec un taux de 21%, après l'acier à 100%, le verre à 75%, papier-carton à 56%, et l'aluminium à 28%. Ces pourcentages sont relativement élevés dans les pays développés, à l'exemple de l'Allemagne où même les pots de yaourts, les barquettes et les films en plastique sont recyclés. Dans les pays en développement tels que l'Algérie, hormis la récupération interne, le recyclage et la récupération du plastique relèvent du secteur informel. (44)

### **III.3 Etapes de recyclage (42)**

Le recyclage des plastiques se compose, principalement, de quatre étapes:

- Collecte

- Séparation
- Traitement

### **III.3.1 Collecte**

Les déchets plastiques peuvent être recueillis pour être recyclés auprès de personnes dans les zones résidentielles en mettant des poubelles en plastique de recyclage dans des lieux accessibles pour la collecte facile. Pour les déchets industriels en plastique, ceux-ci peuvent être collectés à partir de l'industrie. (45)

### **III.3.2 Séparation des matières plastiques**

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour séparer les déchets de matières plastiques mixtes sur la base de leurs propriétés physico-chimiques. (42)(36)

#### **III.3.2.1 Séparation par fluide supercritique (42)**

Cette technique utilise les propriétés de certains fluides qui, placés dans certaines conditions de température et de pression, voient leur phase gazeuse et liquide atteindre des valeurs de densités identiques et se mêler de manière homogène. Au delà d'une température donnée et une pression donnée (point critique), il devient possible de faire varier la densité du fluide et, donc, d'envisager la séparation des matières plastiques de densités sensiblement proches. (46)

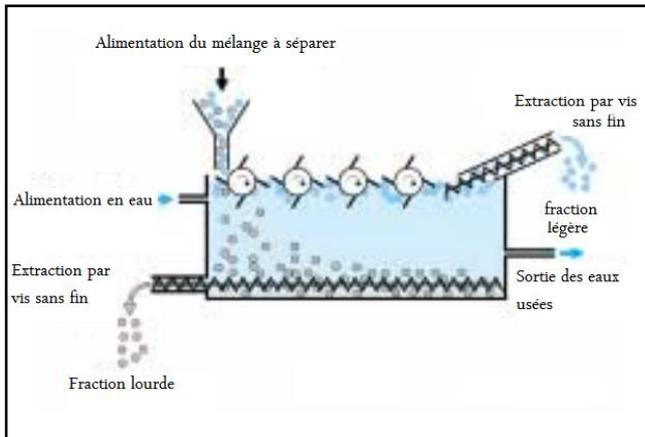
#### **III.3.2.2 La classification hydraulique/pneumatique**

Elle est basée sur les théories des mouvements des solides dans une phase liquide, et donc sur la résistance opposée par un fluide lors du déplacement d'un solide dans celui-ci.

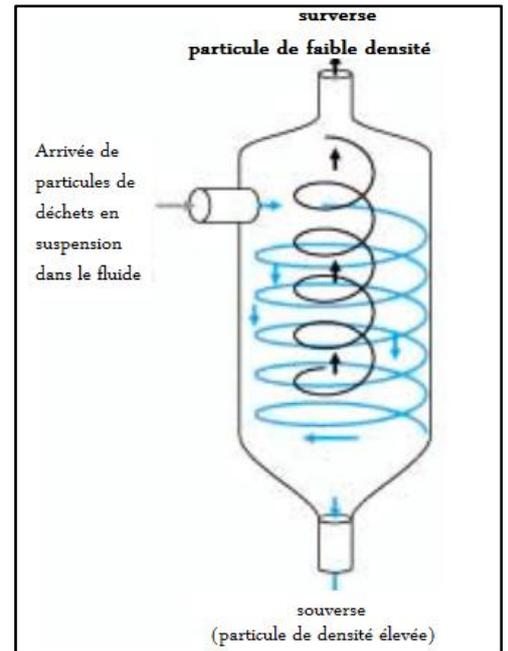
- **Classification hydraulique**

Elle utilise un liquide (le plus souvent de l'eau) dans lequel on va conjuguer les actions simultanées de la gravité et les forces résultant de la résistance à la pénétration des particules dans le milieu plus ou moins fluide. On distingue alors la séparation « flotté/coulé » pratiquée en bac de flottation-décantation, selon le principe de la poussée d'Archimède. Les particules de plus faible masse volumique flottent dans le bain et sont récupérées par écrémage, alors que les plus lourdes décantent et sont collectées en fond de cuve par des vis d'extraction (système à fluide stationnaire) (figure III.1).

Ce principe simple peut être amélioré en utilisant un fluide en mouvement dans une cuve conique (hydrocyclone) (figure III.2). (47)(48)



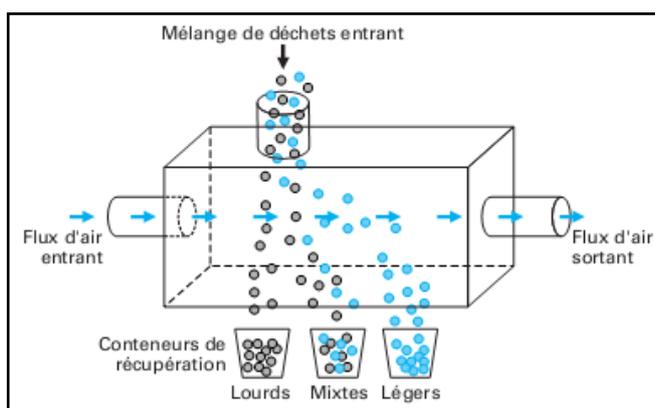
**Figure III.1 :** Principe de flottation – décantation.(28)



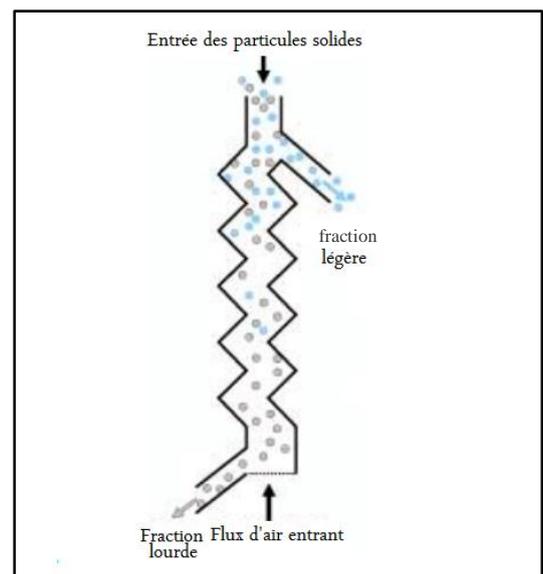
**Figure III.2 :** Schéma de principe de l'hydrocyclone. (28)

- **Classification pneumatique**

Elle utilise un flux d'air et est basée sur les mouvements relatifs des particules, les unes par rapport aux autres, et par rapport au fluide. On trouve des classificateurs pneumatiques à courant ascendant de type zig-zag, par centrifugation ou, encore, du type « air-knife » (figures III.3 et figure III.4).



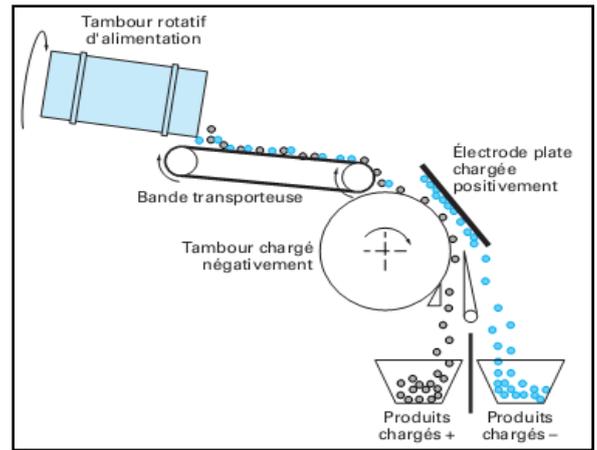
**Figure III. 3 :** Schéma du principe de séparateur à Air-Knife. (28)



**Figure III. 4 :** Schéma du séparateur à zig-zag.(28)

**III.3.2.3 Tri électrostatique**

Basé sur la propriété qu'ont les matières plastiques d'acquérir une charge positive ou négative, lorsqu'elles sont placées dans un champ électrique. Dans un second temps, ces particules sont placées dans un champ électrique très intense généré entre deux électrodes et vont réagir par attraction ou répulsion vis-à-vis de ces électrodes (figure III.5). (28)

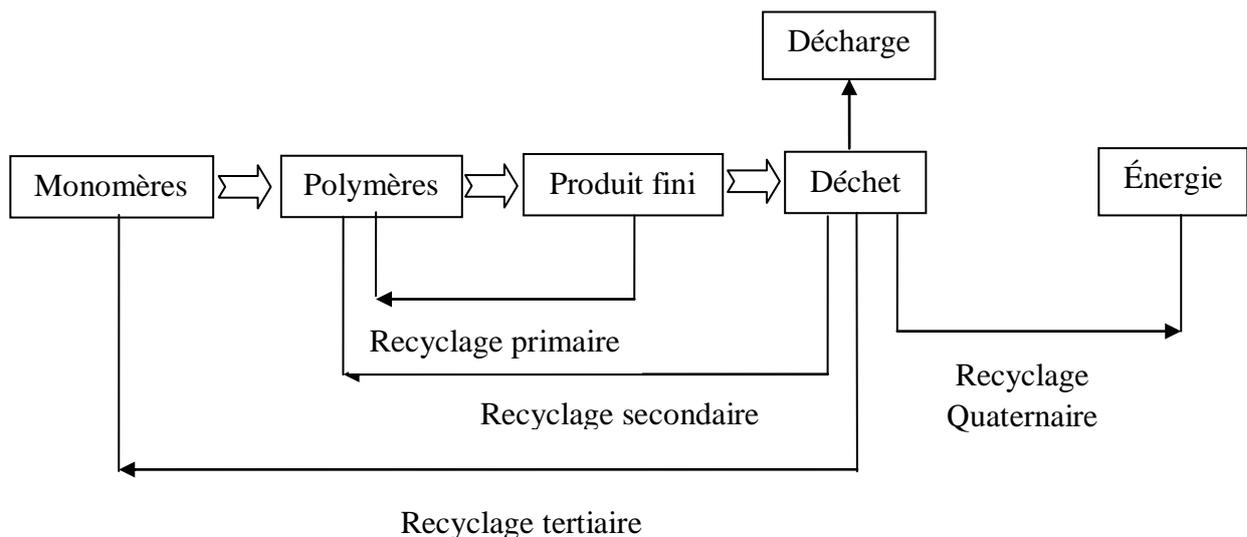


**Figure III.5:** Séparateur de déchets par tri électrostatique.(28)

Tous les procédés de séparation souffrant de certains inconvénients majeurs tels qu'un surplus de travail et de leur coût élevé (31). Le **tri manuel** peut être utilisé en plus des opérations présentés ci-dessus, Il intervient très en amont des opérations de traitement des déchets plastiques.(28)

**III.3.3 Traitement**

Le recyclage des déchets de polymères peut être réalisé de plusieurs façons. Quatre approches principales ont été proposées présentés sur le schéma suivant (figure III.6). (49)(50)



**Figure III. 6 :** Schéma de différentes techniques de recyclage d'un déchet plastique.(49)

### III.3.3.1 Recyclage primaire

Il s'agit de recyclage en usine des rebuts. Ce processus reste le plus populaire, car il garantit la simplicité, le faible coût, traitant toutefois seulement avec le recyclage des déchets propres non contaminés de type unique.

### III.3.3.2 Recyclage mécanique (recyclage secondaire)

Dans ce processus, le polymère est séparé de ses contaminants associés et il peut être aisément retransformé en granulés par extrusion à l'état fondu classique.

Il consiste en une réduction dimensionnelle des produits comprend la refusion et le remoulage comme nouvelle matière. (51)

Le polymère de base n'est pas modifié pendant ce processus. Le principal inconvénient de ce type de recyclage est la détérioration des propriétés du produit lors de chaque cycle. Les stratégies pour restaurer (en partie) les propriétés initiales en polymère pendant le retraitement comprennent le séchage intensif, avec retraitement de dégazage sous vide, l'utilisation de composés d'extension de chaîne, ajout des additifs et résines vierges...(34)(37)

### III.3.3.3 Recyclage Chimique (recyclage tertiaire)

Aussi appelé recyclage en matières premières, a été défini comme le processus menant à la dépolymérisation totale en monomères, ou partielle en oligomères et autres substances chimiques. Les monomères peuvent ensuite re-polymériser pour régénérer le polymère d'origine.

Le recyclage chimique des matières vise à décomposer les molécules constituant des résines en matières premières utilisables à nouveau dans les raffineries, la pétrochimie et la chimie. (51)(52)

Un certain nombre de techniques sont actuellement à l'étude (peu appliquées)(53)

- **Pyrolyse** : c'est une autre solution qui est actuellement en cours de développement (54). Il consiste en une décomposition des molécules par chauffage sous vide. ce procédé conduit à des hydrocarbures liquides ou gazeux utilisables ultérieurement dans les raffineries. (55)

- **Hydrogénation** : traitement par l'hydrogène et la chaleur des polymères qui sont craqués en huiles hydrocarbonées utilisables dans les raffineries et les usines de produits chimiques. Un certain nombre d'entreprises mettent en place des faibles niveaux de déchets plastiques dans hydrocraqueurs qui produisent naphtha, qui peuvent ensuite être utilisés dans le cadre de départ pour d'autres applications, y compris la polymérisation.(54)
- **Gazéification** : les plastiques sont chauffés en présence d'air ou d'oxygène ; le gaz de synthèse résultant est constitué de monoxyde de carbone et d'hydrogène qui peut être utilisé dans la production de méthanol ou d'ammoniac ou encore comme agent réducteur dans la production d'acier.

Toutefois tous ces procédés n'ont pas encore prouvé leur rentabilité économique. Les applications de cette voie de recyclage, attrayante dans son principe, sont jusqu'à présent limitées, à des polymères comme le PET et le PMMA, du fait de problèmes pratiques et de rentabilité. Ce principe de recyclage n'en est encore qu'à un stade pilote.(56)

#### III.3.3.4 Récupération d'énergie

La récupération d'énergie à partir des déchets plastic est considérée comme un **recyclage Quaternaire**. Il se réfère à la récupération du contenu énergétique de plastique en exploitant son pouvoir calorifique. L'incinération visant à la récupération d'énergie est actuellement le moyen le plus efficace de réduire le volume de matières organiques. Bien que les polymères sont effectivement à haut rendement des sources d'énergie, cette méthode a été largement accusé comme écologiquement inacceptable en raison du risque de la santé causée par les substances toxiques libérées à l'air par exemple dioxines (dans le cas de polymères contenant du chlore).

Outre les méthodes ci-dessus, la réutilisation ou le réemploi direct d'un matériau de plastique (comme PET) peut être considéré comme une technique de recyclage "**d'ordre zéro**" où l'objet est réemployé pour l'usage pour lequel il était initialement prévu ou réutilisé pour un autre usage.(57)

Dans un proche avenir, les processus de recyclage des déchets plastiques seront élargis pour aborder la théorie de la fabrication inverse.(58)

Généralement par le terme recyclage on entend l'un des deux types : le recyclage mécanique ou recyclage chimique. Quelques limitations de ces deux derniers sont présentées dans les paragraphes suivants.

### **III.4 Limitations des procédés de recyclage des polymères**

#### **III.4.1 La collecte des déchets**

Parmi ceux-ci, les déchets de matières plastiques constituent un gisement très important, réparti depuis le secteur industriel jusqu'au niveau du consommateur, en passant par les différents réseaux de distribution et de commercialisation. Cette large dispersion du gisement constitue une des difficultés majeures de la valorisation de ces déchets. Le gisement est dispersé géographiquement et, de ce fait, sa collecte pose des problèmes. Des opérations de regroupement et de collecte par apport volontaire ont été mises en place à de nombreuses reprises sans qu'un véritable succès ait été atteint.

#### **III.4.2 séparations des mélanges**

La séparation des plastiques est onéreuse et parfois impossible dans le cas de mélange de plusieurs plastiques (32). De plus, le recyclage de cette matière provoque parfois la perte de certaines propriétés de la matière (24) (59). De même, le développement sans cesse croissant de produits finis coextrudés, de pièces imprimées dans la masse et de pièces co-injectées pose le problème de leur recyclage (28). En termes de recyclage mécanique, il est bien connu que des polymères sont immiscibles et démontrent de faibles propriétés mécaniques dues à une mauvaise compatibilité. (60)

#### **III.4.3 Vieillissement des polymères (61)(62)**

Le vieillissement correspond à une évolution lente et irréversible d'une ou de plusieurs propriétés du matériau à partir d'un point de référence, généralement pris dès la fin du cycle de fabrication. Il se traduit par une altération de ses propriétés (Poids moléculaire, structure moléculaire, résistance à la traction) et/ ou une fragmentation (63). Affectée par les paramètres environnementaux et peut résulter de modifications de la structure des macromolécules qui assurent leur cohésion mécanique, de leur composition ou de sa morphologie. Il peut être physique ou chimique.(64)

### **III.5 Procédés d'élimination des déchets en cours de développement**

### III.5.1 Procédés de Biodégradation

Bien que les polymères de synthèse soient prévus dans leur grande majorité pour avoir les meilleures résistances possibles à l'eau et aux micro-organismes et pour garder leurs propriétés mécaniques et leur stabilité dans l'environnement, des plastiques susceptibles de biodégradation ont été développés (65) (66). Ce type de matériaux est déjà agréé en Allemagne pour la fabrication d'articles à usage alimentaires (gobelets, assiettes et couverts jetables).

### III.5.2 Photodégradation (62)

Par exposition aux radiations solaires, les matières plastiques (en général des films) dans lesquelles on a incorporé des agents sensibilisateurs photodégradants deviennent fragiles et se fragmentent. On arrive à régler ainsi la durée de vie du film en fonction de la durée et de l'intensité de l'ensoleillement. (37) (52)

## III.6 Solutions et perspectives

La séparation des déchets à base de polymères consiste un véritable problème pour la gestion et la valorisation des matériaux. Le domaine de recherche des mélanges de polymères n'a cessé de croître durant ces dernières décennies et demeure attrayant de par son potentiel de combiner performances et coûts de production au niveau de l'industrie (54). De ce fait, une valorisation des polymères en mélange est en développement sans être totalement séparés (28). Le recyclage des déchets de plastiques sous forme de mélanges a montré qu'il est possible d'améliorer quelques propriétés perdues comme la résistance à la traction (54). Pour éviter le problème d'incompatibilité des polymères et le limiter, les industriels font recours à des agents compatibilisants qui augmente les interactions entre les polymères(28). C'est pourquoi plusieurs études se sont penchées sur les systèmes binaires compatibilisés à base de résines recyclées. On notera les mélanges PEhd/PP et PEhd/PS compatibilisés par un copolymère d'éthylène-propylène et styrène-butadiène respectivement qui permettent leur réintroduction sur le marché.(60)

Une autre approche qui doit être, aussi, développée, est l'élaboration des matériaux composites qui ont montré leur efficacité à améliorer les propriétés mécaniques thermiques des matériaux polymères, cela est mis en évidence au cours plusieurs recherches.(67)

## **CONCLUSION GENERALE**

Au cours de ce travail, nous avons présenté les différentes voies utilisées pour le recyclage des déchets plastiques qui sont un problème courant avec la croissance spectaculaire de la consommation de ces matières.

Dans un premier temps, nous avons donné des généralités sur les polymères, selon leurs utilisations trois grandes classes peuvent apparaître : fibres, élastomères, et plastiques auxquels nous allons s'intéresser. Dans un deuxième temps nous avons cité l'état d'évolution de la consommation des plastiques, leurs principaux gisements des déchets plastiques et les principaux polymères qui les constituent pour terminer le chapitre par les dangers que présentent les déchets plastiques sur la vie et l'environnement.

Dans un dernier temps nous avons présenté les différents types de recyclage et ses principales étapes en mentionnant les limites qu'ils présentent et les solutions actuelles et en cours de développement pour affronter ces problèmes.

Les matériaux plastiques ont envahi notre vie. Leur consommation et la production des plastiques (à cause de leur utilisation partout principalement dans d'emballage) ne cessent de croître. Leur production est estimée à plus de 8.90 kilos de plastique par seconde en 2012, donnant lieu à un tas de déchets de plus en plus grand qui menace la santé humaine, le côté esthétique environnemental, et les écosystèmes animal et végétal. Cette augmentation rend la gestion des déchets de plus en plus difficile. Plusieurs méthodes de valorisation des déchets sont utilisées, la plus courante est la mise en décharge. La terminologie de recyclage des matières plastiques est complexe et parfois confuse en raison de la vaste gamme d'activités de valorisation. Ceux-ci comprennent quatre catégories: un recyclage primaire en usine ; secondaire par traitement mécanique, sans changement de la structure chimique du produit; un recyclage tertiaire connu aussi sous le nom de recyclage chimique menant à la dépolymérisation des matières premières par la pyrolyse, l'hydrogénation ou la gazéification ; et enfin la valorisation énergétique qui est considérée comme un recyclage quaternaire, elle se réfère à la récupération du contenu énergétique de plastique en exploitant son pouvoir calorifique.

Bien que les recyclages chimique et mécanique semblent être les bons choix du point de vue du développement durable ils présentent plusieurs limites concernant la difficulté de collecte des déchets et leur séparation. En effet, Pour avoir une meilleure qualité de la matière recyclée, différents types de polymères doivent être séparés les uns des autres, car la majorité des polymères sont incompatibles entre eux ce qui détruit les propriétés des

matériaux produits. Le vieillissement que peut subir les plastiques au cours de leur vie aussi altère les propriétés des produits recyclés. Pour améliorer les propriétés des matériaux obtenus par recyclage, plusieurs initiatives ont été faites, la valorisation des déchets en mélanges et en matériaux composites par l'incorporation des renforts font partie de ces initiatives, leurs efficacités sont mises en évidence dans plusieurs recherches. L'ajout d'agents compatibilisants peut être une solution aux problèmes de compatibilisation.

D'autres voies d'élimination de déchets sont en voie de développement comme la biodégradation et la photo-dégradation pour diminuer la durée de vie des déchets plastiques.

En utilisant la matière première du déchet, on peut fabriquer de nouveaux objets, aussi fiables et de qualité que des produits neufs tout en préservant les gisements des ressources naturelles. Chaque méthode de valorisation a ses propres limites et inconvénients, donc la meilleure solution de diminuer l'impact de ces déchets est de les réduire à la source par le réemploi et la réutilisation; et d'aller vers les polymères biodégradables.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- (1) P. Laszlo, *PLastiques*, [En ligne]. Available:  
<http://www.universalis.fr/encyclopedie/plastiques>. [Accès le 28 Mai 2015].
- (2) R.J. Young, A. P. Lovel, *Introduction to polymers*, 3e Ed. CRC Press p. 688, 2011.
- (3) M. Fontanille, Y. Gnanou, *Chimie et physico-chimie des polymères*, 2e et 3e Ed. Dunod, Paris, 2005.
- (4) C. A. Naudin, *Nomenclature, classification et formules chimiques des polymères, Technique de l'ingénieur A3035*, 1995.
- (5) M. Chanda, *Introduction to polymer science and chemistry*, Ed. CRC Press, Taylor and Francis Group, USA, 2006.
- (6) J. Ghosh, *Fundamental concepts of applied chemistry*, 1e Ed. Chand Ldt, New Delhi, 2006.
- (7) V. R. Gowariker, N. V. Viswanathan, J. Sreedhar, *Polymer science*, 1e Ed. New Age International Publishers Pvt, Ltd, New Delhi, 2005.
- (8) Fonds de Formation professionnelle de la Construction, *Les matières plastiques: généralités*, Bruxelles, 2002.
- (9) J. M. G. Cowie, *Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials*, 2e Ed. Blackie Academic & Professional, Glasgow, 1991.
- (10) C. Duval, *Matières plastiques et environnement : Recyclage, Biodégradabilité, Valorisation*, Ed. Dunod, Paris, 2004.
- (11) US Fire Administration, *Plastics (Part IV: Thermoset and Thermoplastic Polymers), Coffee Break Training American Plastics Council N° 28* 2008.
- (12) D. William, Jr. Callister, *Materials Science and Engineering – An introduction*, 6e Ed. John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- (13) P. T. Williams, E. Slaney, *Analysis of products from the pyrolysis and liquefaction of single plastics and waste plastic mixtures, Resources, Conservation and Recycling vol.51, p.754-769*, 2007.
- (14) Papyjo, Percolat Matériaux, *matieres plastique*, [En ligne]. Available:  
<http://percolat.free.fr/index.htm> . [Accès le 5 6 2015].
- (15) P. M. Subramanian, *Plastics recycling and waste management in the US*, Ed. Resources, Conservation and Recycling, vol.28, p. 253-263, 2000.

- (16) D. V. Rosato, al, *Introduction to Plastics*, Plastics Institute of America Plastics Engineering Manufacturing and Data Handbook, Ed. Springer, Verlag, 2001.
- (17) C. A. Harper, *Handbook of plastics: élastomers and composites*, 3e Ed. McGrawHill Professional Book Group, New York, 1996.
- (18) M. Carrega, V. Verney, *Matières plastiques: Propriétés, mise en forme et applications industrielles des matériaux polymères*, 3e Ed. DUNOD, 2012.
- (19) PlasticsEurope, *Utilisation des plastiques*, [En ligne]. Available: <http://www.plasticseurope.fr/utilisation-du-plastique/emballages.aspx>. [Accès le 06 06 2015].
- (20) planetoscope, *Statistiques mondiale en temps réels*, [En ligne]. Available: <http://www.planetoscope.com/petrole/989-production-mondiale-de-plastique.html>. [Accès le 06 06 2015].
- (21) Y. Shashoua, *Saving plastics for posterity*, Nature, vol. 455, p. 288-289, 2008.
- (22) American Chemistry Council, *The resin review*, The annual Statistical Report of the U.S Plastics Industry, USA, 2007.
- (23) D. S. Achilias, L. Andriotis, I. A. Koutsidis, D. A. Louka, N. P. Nianias, P. Sifaka, I. Tsagkalias, G. Tsintzou, *Recent Advances in the Chemical Recycling of Polymers (PP, PS, LDPE, HDPE, PVC, PC, Nylon, PMMA)*, Ed. D. S. Achilias, 2012.
- (24) *Loi n° 75-633 du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux*, version consolidée au 20 septembre 2000.
- (25) J. J. Robin, *Recyclage des thermoplastiques, techniques de l'ingénieur Am3832*, 2003.
- (26) R. Maurice, *Technologie des plastiques*, Ed. Hermès, Paris, p.319, 1998.
- (27) Groupe de travail technique de la convention de Bâle, *Directives techniques pour l'identification et la gestion écologiquement rationnelle des déchets plastiques et leur Elimination*, Ed. PPUR p. 66, 2001.
- (28) T. Takoungsakdakun, S. Pongstabodee, *Separation of mixed post-consumer PET-POM-PVC plastic waste using selective flotation*, Separation and purification technology vol.54, p. 248-252, 2007.
- (29) P. Le Corroller, *Mélanges de polymères à gouttes composites : application recyclage*, mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, école polytechnique de Montréal, 2010.
- (30) Pricewaterhouse Coopers Advisory, *Etude sur l'opportunité du tri et du recyclage des emballages ménagers plastiques autres que bouteilles et flacons*, Ecobilan Cadet

- International : Note de synthèse pour Eco-Emballages et ADEME, 2009.
- (31) R. Maurice, *Les plastiques dans l'emballage: polymères, technologie de mise en forme, recyclage*, Ed.Hermès, Paris, p.185, 1991.
- (32) R.D. Pascoe, *Sorting of Waste Plastics for Recycling*, Ed. Rapra Technology Ltd et Shawbury, vol.11, p. 107, 2000.
- (33) P. Gautron, *Plastiques : valorisation et recyclage des déchets, Techniques de l'Ingénieur A3830*, 1993.
- (34) C. Duval, *les matières plastiques*, Ed. Dunod, Paris, 2009.
- (35) N. Dorbane, *Quel avenir pour les matières plastiques dans le cadre du développement durable*, Université de Tizi-Ouzou, 2010.
- (36) H. Botta, C. Berdier, J. M. Deleuil, *Eenjeux de la propreté urbaine*, Ed. PPUR, Lyon, 2002.
- (37) E.V. Antonakou, E. Koutsokosta, A.A. Lappas, *Chemical recycling of polymers from waste electric and electronic equipment*, Appl. Polym. Sci., vol.114, p.212-221 , 2009.
- (38) E. A. Williams, P.T. Williams, *Analysis of products derived from the fast pyrolysis of plastic waste*, Analytical and Applied Pyrolysis vol.40-41, p. 347-363 , 1997.
- (39) H. Shent, R.J. Pugh, E. Forssberg, *A review of plastics waste recycling and the flotation of plastics*, Resources, Conservation and Recycling vol.25, p. 85-109, 1999.
- (40) T. Kallel, *Etude des mélanges PE/PS contribution au recyclage*, Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées, Lyon, 2003.
- (41) «notre planete.info,» [En ligne]. Available: [www.notreplanete.info/environnement/definition\\_recyclage\\_dechets](http://www.notreplanete.info/environnement/definition_recyclage_dechets). [Accès le 07 06 2015].
- (42) U.S Environment Protection Agency (EPA), *Municipal solid waste generation, recycling, and disposal in the U.S.A*, Facts and Figures for 2008, Washington, 2009.
- (43) B. Selinger, *Chemistry in the Marketplace*, 3e Ed. Harcourt Brace Jovanovich, 1986.
- (44) J. Bourgois, B. Debrey, V. Laforest, *Traitements chimiques et physico-chimiques des déchets*, Les techniques de l'Ingénieur Vol.G, article 2070, 2000.
- (45) R.D. Pascoe,, *Sorting of Waste Plastics for Recycling*, Ed. RAPRA Technology Ltd et Shawbury, vol. 11 p. 107, 2000.

- (46) D. Braun, *Recycling of PVC*, Progress in Polymer Science, vol. 27: p. 2171-2195, 2002.
- (47) G. P. Karayannidis, D.S. Achilias, *Chemical recycling of poly(ethylene terephthalate)*, Macromol. Mater. Eng., vol. 292, p.128-146, 2007.
- (48) J. Scheirs, *Polymer Recycling*, Ed. John Wiley & Sons, New York, 1998.
- (49) F. M. Windels, *Recyclage des produits manufacturés : le recyclage mécanique des polymères*, European journal of mechanical and environmental engineering vol. 42 p. 32-40, 1997.
- (50) R. Maurice, *Les plastiques : polymères, transformations et applications*, Ed. Hermes, Paris, 1991.
- (51) H. Bockhorn, J. Hentschel, A. Hornung, U. Hornung, *Environmental engineering stepwise pyrolysis of plastic waste*, Chemical Engineering science, vol. 54, p. 3043-3051.
- (52) F. Farahmand, P. Shokrollahi, M. Mehrabzadeh, *Recycling of Commingled Plastics Waste Containing Polyvinylchloride, Polypropylene, Polyethylene and Paper*, Iranian Polymer Journal, vol.12 , p. 185-190.
- (53) N. Belhaneche, M. A. Chabou, *Contribution a la valorisation des déchets de matières plastiques*, article ref.BP182, 2000.
- (54) D. Savostianoff, *Quelle seconde vie pour les plastiques ?*, Caoutchoucs & Plastiques , vol. 722, p. 45–49, 1993.
- (55) D.E. Nikles, M.S. Farahat, *New motivation for the depolymerization products derived from PET waste: A review*, Macromolecular Materials Eng vol. 290 p.13-33, 2005.
- (56) K. Inada, al, *Identification of plastics by infrared absorption using InGaAsP laser diode*, Resources, Conservation and Recycling, vol.33, p. 131-146, 2001.
- (57) C. Silguy, *Histoire des hommes et de leurs déchets : du moyen âge a nos jours*, Ed. Cherche midi, Paris, 2009.
- (58) L. A. Utracki , *Commercial polymer blends*, Ed. Kluwer Academic, London, 1998.
- (59) X. Colin, al, *Rapport de synthèse du Groupe « Vieillissement et durabilité des matériaux*, Ed. ARAGO 28 , 2003.
- (60) F. Khabbaz, A. C. Albertsson, S. Karlsson, *Chemical and morphological changes of environmentally degradable polyethylene films exposed to thermo-oxidation*, Polymer Degradation and Stability, vol. 68? p. 127-138, 1999.
- (61) B. Gherardi, *Organisation multiéchelle et stabilité colloïdale de suspensions d'argiles*

- organophiles en milieu organique*, Thèse chimie-physique: Université d'Orléans, 1998.
- (62) A. Congieras, *Mise au point d'un milieu solide inerte pour l'étude de la biodégradation des polymères dans le composte*, Thèse, Université de Reims Champagne Ardenne, p. 65, 2005.
- (63) A.C. Abertsson S. Karlsson, *Degradable polymers for the future*, Acta polymer, vol. 46, p.114-123 , 1995.
- (64) V.A. Vasnev, *Biodegradable polymers*, polymer Science, vol. 39, p. 474-485, 1997.
- (65) J. M. Galoaguen J. M. Lefebvre, *Nanocomposites polymères/silicates en feuillets*, *Téchnique de l'ingénieur am5205*, 2007.
- (66) R. M. Paroli, K.Y. Liu, T. R. Simmons, *Membranes de couverture en polyoléfine thermoplastique*, 1999.