

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE DE BLIDA 1**

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN SCIENCE ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

Spécialité :

Gestion Durable des Déchets et Procédés de Traitement

Intitulé de mémoire

Étude des impacts d'une mise œuvre industrielle sur les propriétés physico-chimiques d'un film multicouche à base de PET recyclé et PET vierge

Présenté par :

M^{lle} KOUIDRI Anissa

M^{lle} BACHA Sihem

Encadré par :

Pr Bouras Omar

Année Universitaire 2019/2020

REMERCIEMENTS

En tout premier lieu, nous tenons à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

On exprime nos profonds remerciements à tous nos professeurs depuis le primaire jusqu'au supérieur, qui ont brillé par la qualité de leurs enseignements, leurs efforts continus afin de nous donner le maximum de savoir, si nous soutenons aujourd'hui, c'est grâce à leurs conseils, leurs patiences, la transmission de leurs connaissances et leurs savoir-faire.

Nos sincères remerciements vont à notre :

*Encadreur **Mr Bouras Omar**, et Co-promoteur **Mme Djebbar Yasmin**.*

Pour leurs soutiens, leurs aides, leurs patiences inébranlables et surtout leurs conseils précieux non seulement pour réaliser ce travail mais aussi toute au long nos deux ans de master. Nous tenons à vous dire tout simplement Merci du fond de notre cœur.

*Nous adressons également nos remerciements à l'ensemble du personnel de Recycling United, particulièrement à **Amiri Soumia ,Ikhlef Abdel***

Moumen

pour leur aide qui nous a facilité la mise en œuvre de ce projet

Ainsi qu'à nos camarades du Master 2 « G2DPT »

Promotion 2020/2021

Enfin, nous adressons nos remerciements à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la concrétisation de ce mémoire

Dédicaces

Je dédie ce travail

A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études.

Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mon cher père qui n'a jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de

M'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

*A mon cher petit frère **Mohamed Ouali** qui*

M'a vraiment aidé pour ce travail.

*A ma chère sœur **Karima** et son mari **Ishak**,*

Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

*A mon âme sœur et binôme **Sihem**,*

*A ma grand-mère **Zohra**,*

Qui je souhaite une bonne santé.

*A mes chères meilleures amies **Chahrazed** et **Houda, Nabila**,*

Pour leurs soutiens et pour leurs amitiés, amours, merci.

A toutes mes chères tantes, mon oncle et cousins et cousines,

Ainsi que toute ma famille que j'aime.

Anissa.

Dédicaces

*Je dédie cet humble travail avant tout à celle qui à tout le mérite et à qui je dois le plus grand respect, celle qui m'a donné l'amour, la compréhension, la tendresse, le courage et la volonté, à la femme dont l'affection, et la grandeur d'âme et d'esprit m'a permis d'arriver à surmonter tous les obstacles pour pouvoir donner le meilleur de moi-même : à toi ma très chère **MAMAN** qui a dû me supporter pendant tout le temps que m'a pris mon travail.*

*- À celui qui a consacré toute son existence pour me chérir et m'épauler devant chaque épreuve difficile, celui qui m'a ouvert l'horizon de la vie, à mon **PAPA**.*

*- À mes très chers frères qui n'ont jamais cessé de croire en moi : **MOHAMED, MOUNIR**.*

*- À mon cher mari qui a toujours été à mes côtés pendant tout mon parcours : **HAKIM**.*

*- À ma très chère sœur et binôme : **ANISSA**.*

*- À mes grands parents, mes oncles, mes cousins et mes cousines et à toute ma famille **BACHA**.*

*- À mon grand père que dieu ait pitié de son âme, et ma chère grand mère, mes tantes, mes cousins et mes cousines et à toute la famille **BENKHANNOUF**.*

*- À ma belle famille : **SEFFAK**.*

- À ceux qui ont partagé avec moi les moments les plus durs et les plus beaux de tous mon cursus universitaire, mes amies.

- À tous mes amis de la promo à qui je souhaite bonne chance dans leur vie professionnelle.

- À tout qui me connaisse de près ou de loin.

BACHA SIHEM

Liste des Figures

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Matière plastique sous différentes formes	2
Figure I.2	Principe du calandrage	10
Figure I.3	Principe de thermoformage	10
Figure I.4	Principe d'injection	11
Figure I.5	Principe d'injection de soufflage	11
Figure I.6	Principe d'extrusion	12
Figure I.7	Types de profile obtenu par extrusion	12
Figure I.8	Principe d'extrusion gonflage	12
Figure I.9	Principe d'extrusion de soufflage	13
Figure I.10	Procédé d'expansion moulage	13
Figure I.11	Déchets plastiques déversés dans les océans	15
Figure II.1	Motif de répétition du polyéthylène téréphtalate	18
Figure II.2	Synthèse du PET à partir du diméthyltéréphtalate et de l'éthylèneglycol	19
Figure II.3	Synthèse du PET à partir du diméthyltéréphtalate et de l'éthylène glycol	20
Figure II.4	Dégradation hydrolytique du PET	23
Figure II.5	Evolution de la masse molaire moyenne (déterminée par viscosité intrinsèque) avec le temps d'exposition d'un échantillon de PET dans l'eau à 100°C	24
Figure II.6	Dégradation thermique par rupture ionique	25
Figure II.7	Schéma de dégradation des polyesters saturés au cours de leur dégradation thermique	27
Figure II.8	Dégradation thermo-oxydative du PET	28
Figure II.9	Caractéristique énergétique du vieillissement physique	28
Figure III.1	Utilisation des paillettes de PET recyclé en 2004	34
Figure III.2	Evolution du couple de torsion en fonction du temps pour un PET contenant différentes quantités de PVC Analyses effectuées sous azote, à 260°C avec une vitesse de cisaillement de 130 tr/min D'après M. PACI et al.	36

Liste des Figures

Figure III.3	Quantités de résines consommées dans l’emballage	39
Figure IV.1	Situation géographique du lieu d’étude	40
Figure IV.2	Organigramme dédié aux personnels administratifs de RECYCLING UNITED.	41
Figure V.1	Photographie montrant La balance	45
Figure V.2	Photographie montrant Tapis manuel	45
Figure V.3	Photographie montrant Trommel	46
Figure V.4	Photographie montrant Convoyeur de tirage	46
Figure V.5	Photographie montrant presse hydraulique et réception de balles 300 kg	47
Figure V.6	Photographie montrant PP broyé	48
Figure V.7	Photographie montrant Bassin séparation par densité	49
Figure V.7	Photographie montrant Bassin 2 flottation	49
Figure V.8	Photographie montrant Détecteur de métal	50
Figure V.9	Photographie montrant Cuve de lavage	50
Figure V.10	Photographie montrant Centrifugeuse	51
Figure V.11	Photographie montrant Sortex	52
Figure V.12	Photographie montrant Big-bag	52
Figure V.13	Photographie montrant Etuve	53
Figure V.14	Photographie montrant Appareil Precisa	54
Figure V.15	Photographie montrant Elimination des impuretés	55
Figure V.16	Photographie montrant pvc jaune	55
Figure V.17	Photographie montrant Big bag de pet recycle	55
Figure V.18	Photographie montrant Les chargeurs A et B	56
Figure V.19	Photographie montrant l’écran de contrôle des pourcentages	57
Figure V.20	Photographie montrant Extrudeuse	57
Figure V.21	Photographie montrant Filtre IRINA	58
Figure V.22	Photographie montrant Cylindre de compression et refroidissement	58
Figure V.23	Photographie montrant Ecran d’affichage d’épaisseur	59

Liste des Figures

Figure V.24	Photographie montrant L'ajustement de la laize	59
Figure V.25	Photographie montrant Procédure production du film	61
Figure VI.1	Dégradation du produit en fonction de la température pour les 3 essais effectués.	64
Figure VI.2	Photographie montrant la bobine produite de film alimentaire	67
Figure VI.3	Photographie montrant la Bobine de film alimentaire issu du 2éme essai	68

Liste des Tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	caractéristiques et usage des thermoplastiques	3
Tableau I.2	Caractéristiques et usage des thermodurcissables	6
Tableau I.3	Caractéristiques et usage des élastomères	8
Tableau II.1	Application du PET en fonction de sa viscosité	21
Tableau II.2	Propriétés physiques et thermiques du PET	22
Tableau II.3	Viscosité intrinsèque du PET en fonction de son application	30
Tableau III.1	Propriétés mécaniques d'échantillons de PET vierge et recyclé obtenues par injection	35
Tableau III.2	Production mondiale d'emballage en 2003	39
Tableau IV.1	Tableau des normes de la paillette PET recyclé.	42
Tableau VI.1	Les pourcentages des 3 échantillons	63
Tableau VI.2	Fiche de Contrôle	65

Liste des abréviations

PET : Polyéthylène téréphtalates.

PEHD : polyéthylène haute densité.

PMMA : poly méthacrylate de méthyle.

PEBD : polyéthylène basse densité.

PVC : polychlorure de vinyle.

PUR : polyuréthanes.

TCE : tétrachloroéthylène.

PE : polyéthylène.

PP : polypropylène.

PS : polystyrène.

PC : polycarbonate.

POM : polyxyméthylène.

PA : polyamides.

ABS : acrylonitrile butadiène.

PSE : polyéthylène expansé.

PNUE : programme des nations unies pour l'environnement.

PCI : pouvoir calorifique intérieur.

PIB : produit individuel brut.

IFEC : institut français de l'emballage et du conditionnement.

CET : Centre d'enfouissement technique.

NAOH : Hydroxyde de sodium.

PETR : PET recyclé.

PETV : PET vierge.

ملخص

توفر إعادة تدوير النفايات ميزة مزدوجة. أولاً إنه يوفر المواد الخام وبالتالي يحافظ على الموارد الطبيعية لكوننا. كما من الممكن أنه يجعل تقليل حجم ووزن النفايات لدينا وبالتالي الحد من مخاطر تلوث الهواء والتربة. يتم إعادة تدوير معظم نفايات البولي إيثيلين تيريفثاليت ، بشكل رئيسي من زجاجات المشروبات المستهلكة ، في شكل ألياف بسبب انخفاض كتلتها الجزيئية. من أجل توسيع نطاق استخدام البولي إيثيلين تيريفثاليت المعاد تدويره. يحاول هذا العمل من جهة دراسة وفهم المعلومات التي يمكن أن تساهم في تحسين خصائص فيلم اللصق متعدد الطبقات ، أي تأثير الوقت ودرجة الحرارة وخاصة تأثير تغيير النسبة المئوية لطبقة البولي إيثيلين تيريفثاليت المعاد تدويرها ، فيلم مسحوق ، البولي إيثيلين تيريفثاليت النقي. اتضح أن هذه المعلومة الأخيرة مهمة جداً نظراً لتأثيرها على مؤشر مقاومة الفيلم ولونه وجودته. أظهرت نتائج هذه الدراسة أن السلق خطوة مهمة للغاية في إعادة تدوير مادة البولي إيثيلين تيريفثاليت. يصبح التدهور هاماً من إعادة التدوير الثانية. وزيادة نسبة الريج المعاد تدويره في جعل الفيلم يصبح ساماً وليس غذائياً.

Résumé

Le recyclage des déchets présente un double avantage. Il permet d'abord d'économiser de la matière Première et donc de préserver les ressources naturelles de notre planète. Il permet également de réduire le volume et le poids de nos décharges et donc de limiter les risques de pollution de l'air et des sols. La plus grande partie des déchets de PET provenant essentiellement des bouteilles de boissons consommées, est recyclée sous forme de fibre à cause de la diminution de sa masse moléculaire. Afin d'élargir la gamme d'utilisation du PET recyclé. Le présent travail tente d'une part d'étudier et de comprendre les paramètres qui peuvent contribuer à l'amélioration des propriétés du film alimentaire multicouche , à savoir l'effet de temps et la température et surtout l'effet de la modification des pourcentage de couche de PET recyclé, film broyé, le pet pur. Ce dernier paramètre s'est avéré très important vu son influence sur l'indice de résistivité du film sa couleur et sa qualité. Les résultats de cette étude ont montré que l'étuvage est une étape très importante dans le recyclage du PET. La dégradation devient importante à partir du 2ème recyclage. Et l'augmentation du pourcentage du pet recyclé dans la fabrication du film devient toxique et pas alimentaire.

Summary

Waste recycling offers a double advantage: first, it saves raw materials and thus preserves the natural resources of our planet. It can also reduce the volume and weight of our waste and thus reduce the risk of air and soil pollution. Most of the polyethylene terephthalate waste, mainly from spent beverage bottles, is recycled in the form of fibers due to its low molecular mass. In order to expand the use of recycled polyethylene terephthalate. On the one hand, this work attempts to study and understand the information that can contribute to improving the properties of the multi-layer adhesive film, i.e. the effect of time and temperature and especially the effect of changing the percentage of the recycled PET layer, the powder film, the pure polyethylene terephthalate. This last information turns out to be very important due to its effect on the film's resistance index, color and quality. The results of this study showed that blanching is a very important step in the recycling of PET. Degradation becomes significant from the second recycling. Increasing the percentage of recycled wind will make the film toxic rather than food.

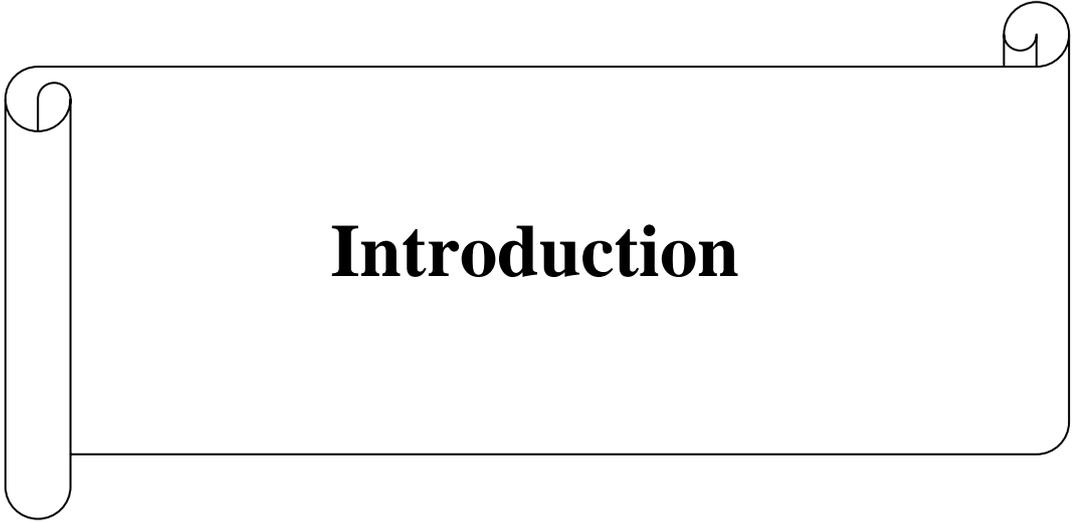
Mots clés: le déchet – le recyclage – le pet – le film alimentaire

Table des matières

Introduction générale	1
Parti 1 : partie théorique	
Chapitre I : Généralités sur la matière plastique	
I.1 Introduction	2
I.2 Définition du plastique	2
I.3 Caractéristiques du plastique	3
I.3.1 Les Thermoplastiques	3
I.3.2 Les Thermodurcissables	6
I.3.3 Les Elastomères	7
I.4 Différents procédés de transformation du plastique :	9
I.4.1 Calandrage	10
I.4.2 Thermoformage	10
I.4.3 injection	10
I.4.4 Injection soufflage	11
I.4.5 Extrusion	11
I.4.6 Extrusion gonflage	12
I.4.7 Extrusion soufflage	13
I.4.8 Expansion moulage	13
I.5 Production mondiale du plastique	13
I.6 Déchets plastiques jetés dans la mer et les océans	14
I.7 Taux de plastique recyclé	15
I.8 Conclusion	15
Chapitre II : Le polyéthylène téréphtalate (PET)	
II.1. Le Polyéthylène téréphtalate	18
II.2 Procédés de fabrication du PET	19
II.2.1 Synthèse à partir de l'acide téréphtalique et de l'éthylène glycol :	19
II.2.2 Synthèse à partir du diméthyltéréphtalate et de l'éthylène glycol :	20
II.3 Principales propriétés du PET	21
II.4 Propriétés physiques	21
II.4.1 Viscosité	21

II.4.2 Cristallisation	21
II.5 Vieillessement et dégradation	22
II.5.1 La dégradation hydrolytique	22
II.5.2 Dégradation thermique	25
II.5.3 Dégradation thermo-oxydative	27
II.5.4 Vieillessement physique	28
II.6 Domaines d'applications du PET	29
Chapitre III : Valorisation du pet en film alimentaire	
III.1 Recyclage des bouteilles en PET	32
III.2 Modes de valorisation des matières plastiques	32
III.2.1 Valorisation énergétique	32
III.2.2 Valorisation de la matière : recyclage chimique	32
III.2.3 Valorisation de la matière : recyclage mécanique	33
III.3 Etapes du recyclage	35
III.4 Du PET bouteille à l'emballage alimentaire	38
III.5 Le monde de l'emballage	38
III.6 Production mondiale d'emballage	39
III.7 Consommation de l'emballage selon les résines	39
Parti 2 : partie expérimentale	
Chapitre IV : Présentation de la zone d'étude	
IV.1 Situation géographique	40
IV.2 Présentation de l'entreprise	40
IV.3 Structure de l'entreprise	40
IV.4 Politique d'entreprise	42
VI.4.1 1 ^{er} volet	42
IV.4.2 2eme volet	42
IV.5 Les normes de la paillette PET recyclé de l'entreprise	42
IV.6 Les activités de l'entreprises	42
Chapitre V : Matériaux et Techniques expérimentaux	

V .1 Problématique et objectif	44
V.2 Matériel utilisé	44
V.2.1 Description des moyens matériels	44
V.3 Méthode	53
V.3.1 Procédure de laboratoire de contrôle	53
V.4 Méthodologie	55
V.4.1 Présentation des produits	55
V.4.2 Transformation par extrusion	56
V.4.3 Condition de travail	60
V.5 Schématisation de procédure	61
Chapitre VI : Résultats et interprétations	
VI.1 Cadre d'étude	63
VI.1.1 Le 1er essai pouvant être comme essai de référence	64
VI.1.2 Conditions de mise en œuvre	64
VI.2 Résultat de chaque échantillon	66
Conclusion	69
Référence Bibliographique	
Annexes	



Introduction

Introduction générale

Le plastique a connu un développement foudroyant, sans comparaison avec celui des autres matériaux. Autrefois, on mesurait le développement d'un pays par la consommation de matière plastique par habitant et par an.

Selon la Fédération des producteurs de plastique 311 millions de tonnes de plastique sont produits mondialement en 2014, soit plus près de 10.000 kilos de plastique par seconde, consommant 8% environ de la production mondiale de pétrole contre 299 millions de tonnes en 2013. (Roselyne Messal,2013)

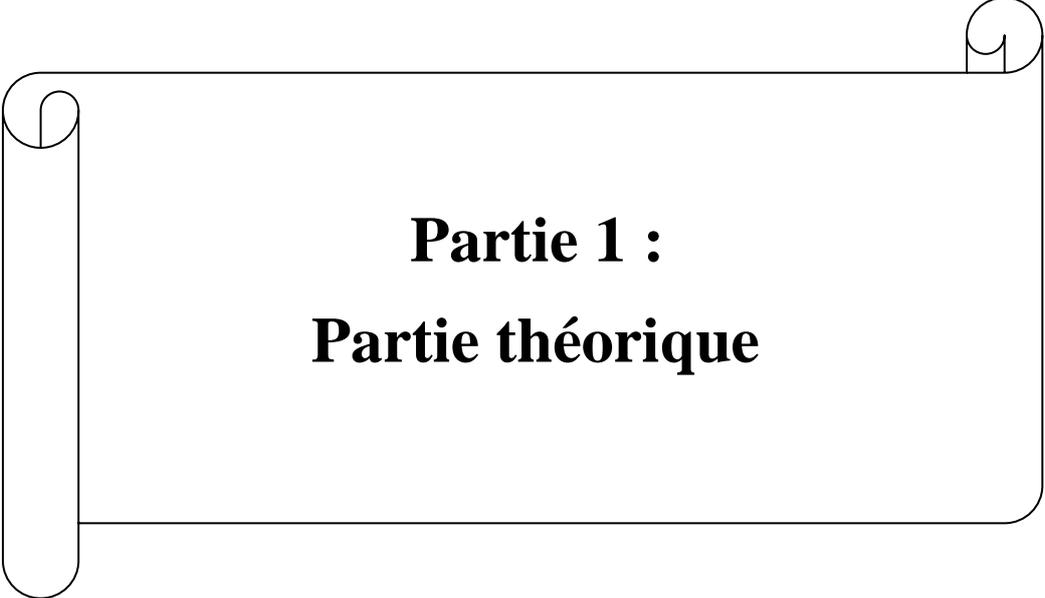
Le plastique a donc toutes les qualités. Son seul problème, c'est son "image". Qui est liée à son élimination. Car, léger, le plastique s'envole au premier coup de vent. Un sac plastique, un gobelet ou une bouteille de polyéthylène téréphtalate (PET) a une durée de vie de plusieurs centaines d'années. Le monde industriel est donc confronté à des exigences croissantes quant à une meilleure utilisation des ressources naturelles, une réduction de la pollution et une meilleure gestion des déchets. Cette pression environnementale touche de plein fouet l'ensemble des matériaux par conséquent le recyclage est devenu au fil des ans une nécessité écologique et un enjeu économique important, parce que utilisation actuelle du plastique est en constante augmentation plus spécifiquement le polyéthylène téréphtalate.

Ce polymère semi-cristallin connu pour son utilisation dans la fabrication de fibres mais surtout de bouteilles de grande consommation, son intérêt est qu'il présente de bonnes propriétés mécaniques et chimiques, ainsi qu'une bonne stabilité thermique, une excellente transparence associée à de bonnes propriétés barrières (perméabilité aux gaz, aux contaminants).

L'objectif de cette recherche est donc d'étudier les processus de dégradation du PET au cours du recyclage et de la retransformations et leur conséquence sur les performances du PET.

Ces modifications structurales constituent l'étape cruciale de notre étude qui devrait aboutir à la conception de systèmes multicouches PET recyclé/PET vierge/film broyé

L'intérêt est donc d'extraire la température utilisée, l'aspect de la couleur, la résistivité envers une opération thermoformage et, de contenir une quantité optimale de PET recyclé à moindre perte en termes de propriétés du film.



Partie 1 :
Partie théorique

I.3 Caractéristiques du plastique

Les plastiques sont des matériaux déformables qui peuvent être moulés ou modelés facilement, en général à chaud et sous pression. Leur facilité de mise en forme, résistance aux chocs, aux variations de température, à l'humidité, aux détergents, les rendent utiles dans tous les domaines : emballage, bâtiment, automobile, électricité, etc... (J-P.Verdu, 1984) .

I.3.1 Les Thermoplastiques

Les thermoplastiques ramollissent sous l'effet de la chaleur et deviennent souples. Ils prennent alors une forme qu'ils garderont en refroidissant. Cette transformation est réversible et renouvelable un grand nombre de fois, ainsi les thermoplastiques sont facilement recyclables. Par contre ils ne sont pas biodégradables et ont une « durée de vie » de plusieurs centaines d'années (Tableau I.1).

Ce sont les matières plastiques les plus utilisées (notamment PE et le PVC).

Tableau I.1 caractéristiques et usage des thermoplastiques

Nom	Caractéristiques	Usage
Polyéthylène(PE)	<p>Translucide, inerte, facile à manier, résistant au froid.</p> <p>On distingue deux familles:</p> <ul style="list-style-type: none"> •le PEBD (polyéthylène basse densité) bonne résistance chimique, olfactivement, gustative ment et chimiquement neutre, facilement transformé et soudé. •le PEHD (polyéthylène haute densité). 	<p>Utilisé dans la moitié des emballages plastiques et dans les domaines les plus divers.</p> <ul style="list-style-type: none"> •PEBD : produits souples : sacs, films, sachets, bidons, récipients et bouteilles souples (sauces, shampoing, crèmes ...) •PEHD : objets rigides (bouteilles, flacons, bacs poubelles, tuyaux, jouets, ustensiles ménagers, boîtes de conservation,

		sacs plastiques).
Polypropylène(PP)	Très facile à colorer. N'absorbe pas l'eau. Aspect brillant et résistant à la température (160°C).Difficile à recycler surtout s'il est imprimé.	Pièces moulées d'équipements automobiles (pare-chocs, tableaux de bord, ...), mobilier de jardin, Film d'emballage, bouteilles rigides, boîtes alimentaires résistantes à la température du lave-vaisselle .Fibres de tapis, moquettes, cordes, ficelles.
Polystyrène (PS)	Dur et cassant. Trois types: •polystyrène "cristal" transparent. •polystyrène "choc" (HIPS) ; acrylonitrile butadiène styrène ABS) •polystyrène expansé (PSE), inflammable et combustible.	Usages variés : mobilier, emballages, jouets, verres plastiques, pots de yaourt, ... •cristal : nombreux types de boîtes, boîtiers CD... •ABS : produits rigides, légers et moulés (bacs à douche...) •PSE : emballage « anti chocs », isolant thermique .

<p>polycarbonate(PC)</p>	<p>Excellentes propriétés mécaniques, bonne résistance thermique jusqu'à 120°C, très transparent, physiologiquement neutre. Mauvaise résistance aux contacts prolongés avec l'eau, aux agents chimiques et aux rayons ultraviolets.</p>	<p>Casques de moto, boucliers de police, CD et DVD, vitres pare-balle, phares, feux arrière et clignotants d'automobile, matériel médical et prothèses, biberons incassables, profilés de toiture, vitres de cabine téléphonique...</p>
<p>Polyesters et Polyéthylène téréphtalate (PET)</p>	<p>Mou à moyenne température.</p>	<p>Fabrication de fils textiles, de films et de bouteilles d'eau et de sodas. Usage limité par la température.</p>
<p>Polyacétals ou Polyoxyméthylène(POM)</p>	<p>Solides et avec des qualités de métaux. Résistant à la plupart des agents chimiques, faible coefficient de frottement. Densité élevée. Assez faible résistance thermique.</p>	<p>pièces à fortes exigences mécaniques : engrenages, poulies. La recherche vise à augmenter leur résistance au choc pour permettre la réalisation de plus grosses pièces.</p>
<p>Polychlorure de vinyle (PCV)</p>	<p>Rigide ou souple selon les ingrédients qu'on lui incorpore.PVC rigide : aspect lisse et dur.</p>	<p>Dans l'industrie de l'ameublement, bâtiment, le génie civil et dans l'alimentaire : pots de margarine, blisters, bouteilles d'eau, emballage alimentaire ...</p> <ul style="list-style-type: none"> •PVC rigide : utilisé pour les tuyaux de canalisation. •PVC souple: recouvre certains manches de

		pinces...
Polyamides(PA)	Différents types de PA (selon la longueur des chaînes) distingués par des chiffres. Bon compromis entre qualités mécaniques, thermiques ,chimiques et Hydrophiles.	Pièces moulées dans l'appareillage ménager et automobile, tapis et moquettes, pièces de robinetterie, de serrurerie, engrenages, ...Textiles (lingerie et voilages)...
Poly méthacrylate de méthyle(PMMA)	Transparent, même avec une très grande épaisseur (jusqu'à 33 cm d'épaisseur); à la différence du verre .L'ajout de PMMA dissout permet aux huiles lubrifiantes et fluides hydrauliques de conserver leur liquidité au froid (jusqu'à -100°C !)	Nom commercial Plexiglas, Lucite, Altuglas, ...Utilisé pour remplacer le verre pour des vitres incassables, les surfaces des baignoires et des éviers, pour les vitres de grands aquariums résistantes à la pression de l'eau... feux arrière et clignotants, hublots d'avion, fibres optiques, enseignes lumineuses...

*La température de « ramollissement » étant moins élevée que celle du verre, les thermoplastiques ne peuvent pas être utilisé avec des produits chauds (comme par exemple la confiture qui, encore très chaude, sera mise dans des pots de verre).

*Les sacs plastiques en PEHD se froissent facilement sous la main, avec un bruit craquant et reviennent spontanément à sa forme d'origine alors que les sacs en PEBD se froissent sans bruit et se percent facilement et ont un toucher plus « soyeux ».

I .3.2 Les Thermodurcissables

Au premier refroidissement, ces plastiques prennent une forme définitive : ils deviennent durs et ne se ramollissent plus une fois moulés. C’est une technique de fabrication difficile à mettre en œuvre mais les matériaux produits sont très solides et très résistants à la chaleur et aux agressions chimiques (Tableau I.2).

Les aminoplastes sont les plastiques thermodurcissables les plus utilisés.

Tableau I.2 : Caractéristiques et usage des thermodurcissables

Nom	Caractéristiques	Usages
Polyuréthanes (PUR)	Grande diversité de dureté et textures en fonction des associations chimiques de différents monomères.	Mousses souples ou rigides grâce à des agents d’expansion, colles, fibres (Licra)Matelas, sièges de voiture, tableaux de bord, roues de patins à roulettes, chaussures de ski...
Polyesters insaturés	Prix peu élevé, durcissement assez rapide sans élimination de produits secondaires. Imprégnation facile des fibres de verre.	Pièces plastiques renforcées par coulée : pales d’éoliennes, coques et cabines de bateaux, piscines, carrosseries d’automobiles, Textiles (Dacron, Tergal, Térylène...).
Phénoplastes (PF)	Bonne résistance aux produits chimiques et à la chaleur et électriquement isolantes. Transformable par moulage et par compression. Souvent colorés en brun foncé.	Domaines scientifiques et réalisation d’objets : téléphones, postes de radio, pour fabriquer les poignées de casserole, de fer à repasser et des plaques de revêtement.

<p>Aminoplastes (MF)</p>	<p>Deux types principaux : urée formaldéhyde (UF) et mélamine formaldéhyde (MF) dont le plus connu est le formica. Dureté et rigidité exceptionnelles, peu sensibles à l'hydrolyse et à la lumière, résistance à l'abrasion, bonne tenue aux solvants, difficilement inflammables. Peuvent être produits en teintes claires.</p>	<p>Usages variés : mobilier de cuisine, plans de travail, liants (adhésifs) dans les contreplaqués, bois agglomérés, mélaminés, etc.), moulage en stratifiés décoratifs de revêtements, pièces moulées d'ustensiles de cuisine (plateaux...), matériel électrique (interrupteurs, prises de courant...), vernis de parquets (vitrification), apprêts pour rendre les tissus indéfrisables ou plastifiés, peintures, etc.</p>
--------------------------	--	--

I.3.3 Les Elastomères

Les élastomères ne sont pas réellement des « plastiques » .Ils sont élastiques qui se déforment et tendent à reprendre leur forme initiale et supportent de très grandes déformations avant rupture.

Issu du latex d'Hévéas (arbre d'Amazonie), le caoutchouc naturel est resté longtemps le seul élastomère connu mais les méthodes modernes de fabrication ont permis d'obtenir une grande diversité de matériaux en ajoutant des additifs, accélérateurs, agents protecteurs (anti UV, anti oxygène,..) et en les combinant à d'autres matériaux (métaux, textiles, autres plastiques...).

Comme le montre le Tableau I.3, On distingue trois grandes catégories qui présentent chacune de nombreux produits aux propriétés variées :

Tableau I.3 : Caractéristiques et usage des élastomères

Catégories	Matériaux	Caractéristiques
Caoutchoucs	<ul style="list-style-type: none"> •Caoutchouc naturel, cis-1,4-poly isoprène (NR). •Copolymère styrène-butadiène (SBR). •Polybutadiène (BR). •Poly isoprène synthétique (IR). 	<p>Chauffés au-dessus de 65 °C, ils commencent à vieillir et deviennent poisseux. Faible résistance à l'huile et à l'ozone. Propriétés d'amortissement et grande extensibilité (jusqu'à 750 % avant rupture). Excellent résistance au déchirement.</p>
Elastomères spéciaux	<ul style="list-style-type: none"> •Co-ou ter polymères d'éthylène propylène et diène (EPM et EPDM). •Copolymères d'isobutylène isoprène, chlorés ou bromés (IIR, BIIR, CIIR). •Copolymères de butadiène acrylonitrile (NBR). •Polychloroprènes (CR). 	<p>Température maximum d'utilisation : 150 °C.</p> <p>Selon les matériaux : résistance aux produits pétroliers, aux solvants ; à l'oxydation (O₂ et O₃), aux intempéries, aux produits chimiques corrosifs et au vieillissement... Certains sont ininflammables et ont une grande imperméabilité aux gaz.</p> <p>Parfois sensible à la lumière et à l'ozone et au stockage (tendance à la cristallisation).</p>
Elastomères très spéciaux	<ul style="list-style-type: none"> •Caoutchoucs de silicone (VMQ, FVMQ). •Elastomères fluorés (FKM). •Polyéthylènes chlorés et chlorosulfonés (CM, CSM). •Polyacrylates (ACM). 	<p>Très variables en fonction des matériaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> •Copolymères éthylène acétate de vinyle (EVM). •Éthylène acrylate de méthyle (AEM). •Caoutchoucs nitrile

	<ul style="list-style-type: none"> •Copolymères éthylène acétate de vinyle(EVM). •Ethylène acrylate de méthyle (AEM). •Caoutchoucs nitrile hydrogénés (HNBR)? •Epichlorhydrines (CO, ECO, GECO). •Polyuréthanes malaxables(AU, EU). 	<ul style="list-style-type: none"> hydrogénés (HNBR). •Epichlorhydrines (CO, ECO, GECO). •Polyuréthanes malaxables (AU, EU).
--	--	---

Les élastomères présentent des caractéristiques bien spécifiques : grande élasticité, bonne étanchéité, fort pouvoir amortissant...Employés essentiellement en tant que pneumatiques, on les utilise également sous la forme de joints, de tubes et tuyaux, de membranes, de dispositifs antivibratoires, dans de nombreux domaines d'activités : automobile, industrie, aéronautique, médecine (J-P.Verdu, 1984) .

I.4 Différents procédés de transformation du plastique

Pour (Nathalie Briand ,2014) , les matières plastiques sont des polymères destinés à la transformation et se présentent sous forme de liquides, de poudres ou de granulés.

Pour les transformer et les façonner il existe huit principaux procédés.

I.4.1 Calandrage

Le calandrage permet de fabriquer des produits semi-finis, comme des films. Dans une machine appelée calandre, les matières thermoplastiques, mélangées à des additifs et des stabilisants, sont écrasés entre plusieurs cylindres parallèles.

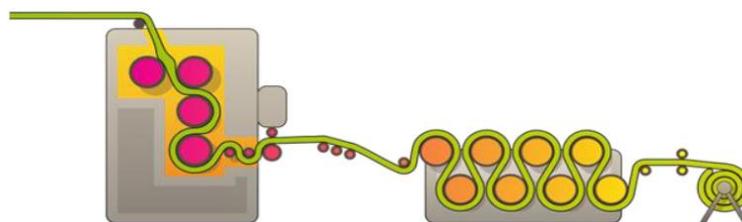


Figure I .2 : principe du calandrage

I.4.2 Thermoformage

Derrière ce terme compliqué se cache le procédé de fabrication qui permet de réaliser toutes sortes d'objets aux formes creuses. Concrètement, pour les emballages, le thermoformage permet de créer des barquettes, des gobelets ou encore des pots de yaourt.

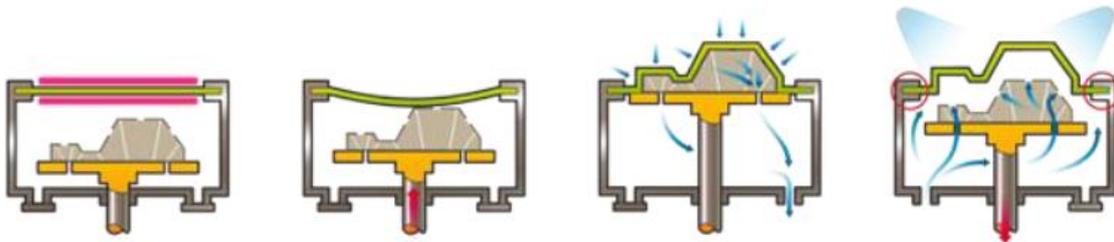


Figure I .3 : principe de thermoformage

I.4.3 injection

Les jouets et les figurines en plastique ont été façonnés à partir de cette technique de moulage appelée l'injection. C'est un procédé de fabrication qui permet de créer des objets moulés avec des formes compliquées en grande série. Cette technique est parfaitement adaptée pour la réalisation de pièces de très petite ou de grande taille (de quelques dixièmes de grammes à plusieurs kilogrammes).

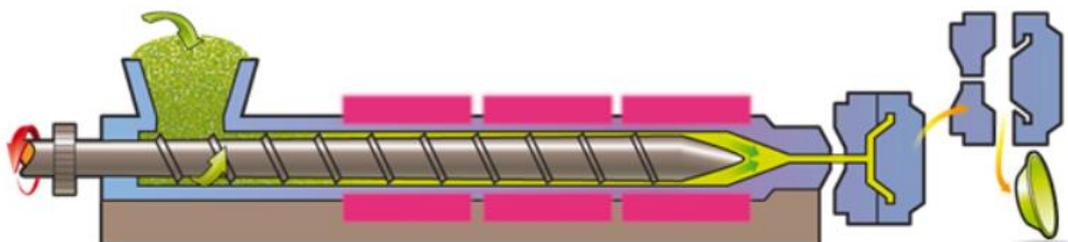


Figure I .4 : Principe d'injection

I.4.4 Injection soufflage

Pour la conception des bouteilles, des flacons ou encore des biberons, on utilise l'injection soufflage.

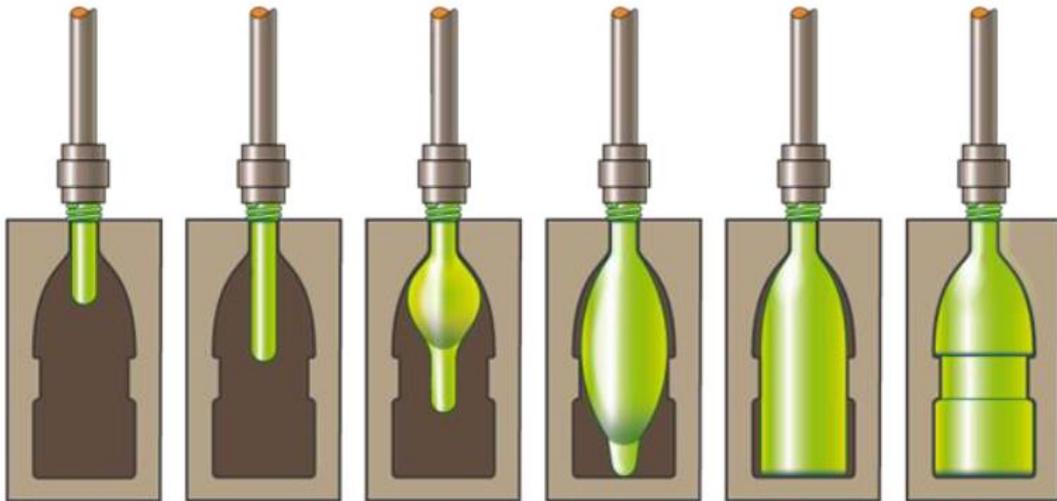


Figure I .5 : Principe d'injection de soufflage

I.4.5 Extrusion

L'extrusion est le procédé de transformation qui sert à fabriquer des pièces en longueur comme des tuyaux, des gouttières ou des tubes... De dentifrice par exemple.

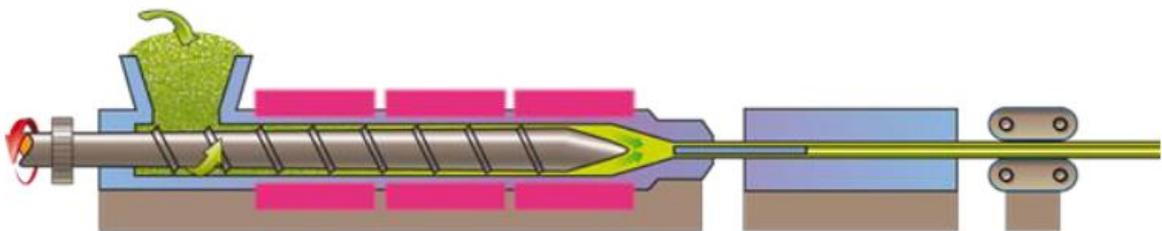


Figure I .6 : Principe d'extrusion



Figure I .7: Types de profile obtenu par extrusion

I.4.6 Extrusion gonflage

Ce procédé est un dérivé de l'extrusion, il consiste à souffler en continu de l'air à l'intérieur d'un tube appelé paraison pour la faire gonfler. Ce procédé ne nécessite pas de moule, c'est l'air soufflé qui donne la forme et le refroidissement. Cette technique permet de fabriquer des sacs plastiques.

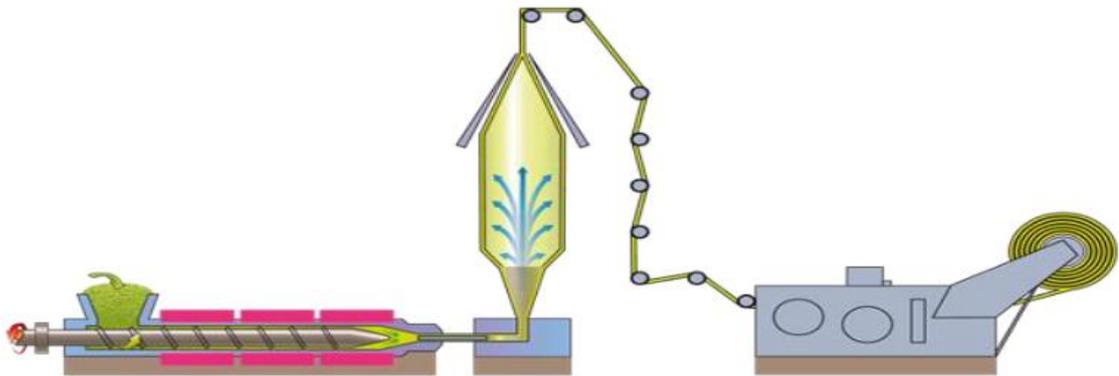


Figure I.8 : Principe d'extrusion gonflage

I.4.7 Extrusion soufflage

Ce procédé consiste à combiner la technique de l'extrusion avec celle du soufflage. Il permet de fabriquer des objets creux comme les bouteilles de lait ou les flacons de lessive par exemple.

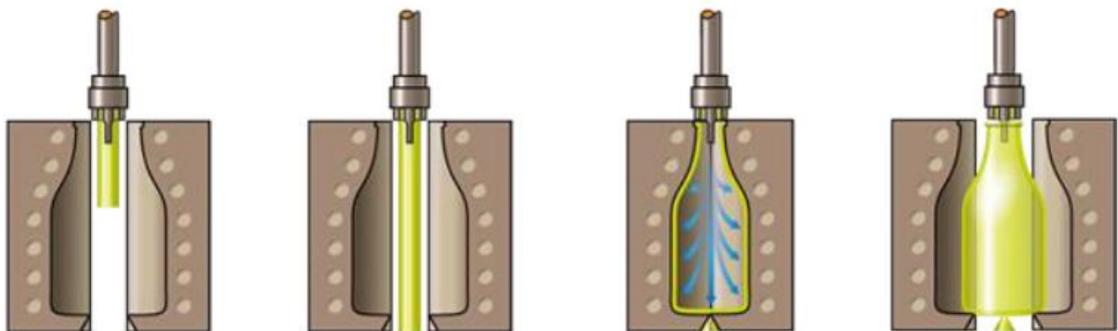


Figure I .9 : Principe d'extrusion de soufflage

I.4.8 Expansion moulage

Le dernier procédé de transformation est appelé expansion moulage. Il sert à fabriquer toutes sortes d'emballages en polystyrène expansé.

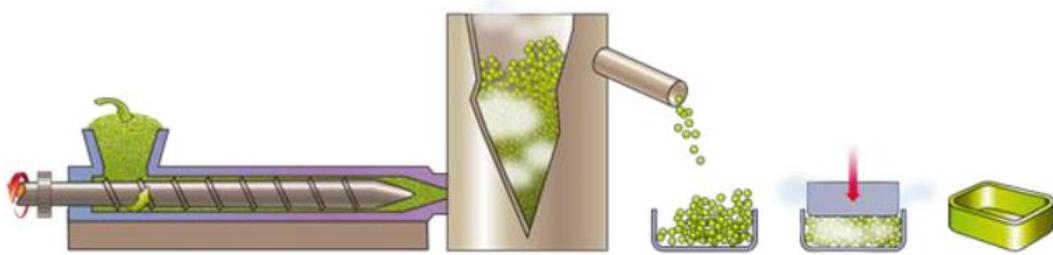


Figure I .10 : Procédé d'expansion moulage

I .5 Production mondiale du plastique

Selon la Fédération des producteurs de plastique 311 millions de tonnes de plastique sont produits mondialement en 2014, soit plus près de 10.000 kilos de plastique par seconde, consommant 8% environ de la production mondiale de pétrole contre 299 millions de tonnes en 2013.

La Chine représente le plus grand producteur de plastique dans le monde, avec 26% du total mondial, suivie de l'Europe avec un 20%. Par contre, l'Afrique et le Moyen Orient, ne produisent que 7%, et 5% en Amérique Latine.

L'Allemagne arrive en tête dans la consommation du plastique par 24.9% suivie par l'Italie 14.3% ensuite la France par 9.6%. (Roselyne Messal,2013) .

I .6 Déchets plastiques jetés dans la mer et les océans

En 2014, les déchets plastiques sont estimés à 25 millions de tonnes annuellement en Europe, d'ont 6,5 à 8 millions de tonnes sont déversées dans les océans et qui finissent en microparticules ingérées par la faune marine.

Les mers et les océans reçoivent quotidiennement environ 8 millions de déchets plastiques, dont 5 millions (63%) sont des déchets solides, tombés ou jetés depuis les bateaux. (Programme des Nations Unies pour l'environnement - PNUE)

Dans la Méditerranée, 250 Milliards de micro-fragments de plastiques flottent sur la mer selon les relevés de l'expédition "Méditerranée en danger" et sont menées au large de côtes européennes en juillet 2010.

Des morceaux de plastiques, invisibles à l'œil nu, sont contenus dans les sédiments des plages, les bas-fonds des zones côtières et le sable, selon des chercheurs de l'université de Plymouth.

On assiste actuellement à une pollution massive engendrée par la matière plastique car les différentes sortes de polymères des sacs vont mettre entre un siècle et 1000 ans pour se dégrader, largement le temps de se décomposer en déchets microscopiques qui pourraient passer dans la chaîne alimentaire avec des conséquences encore mal évaluées.

La faune marine est la plus touchée actuellement, car elle reçoit quotidiennement ces déchets dangereux, on estime qu'il y a 50 millions de déchets non biodégradables à moyen terme. (Roselyne Messal,2013) .



Figure I .11 : Déchets plastiques déversés dans les océans

I.7 Taux de plastique recyclé

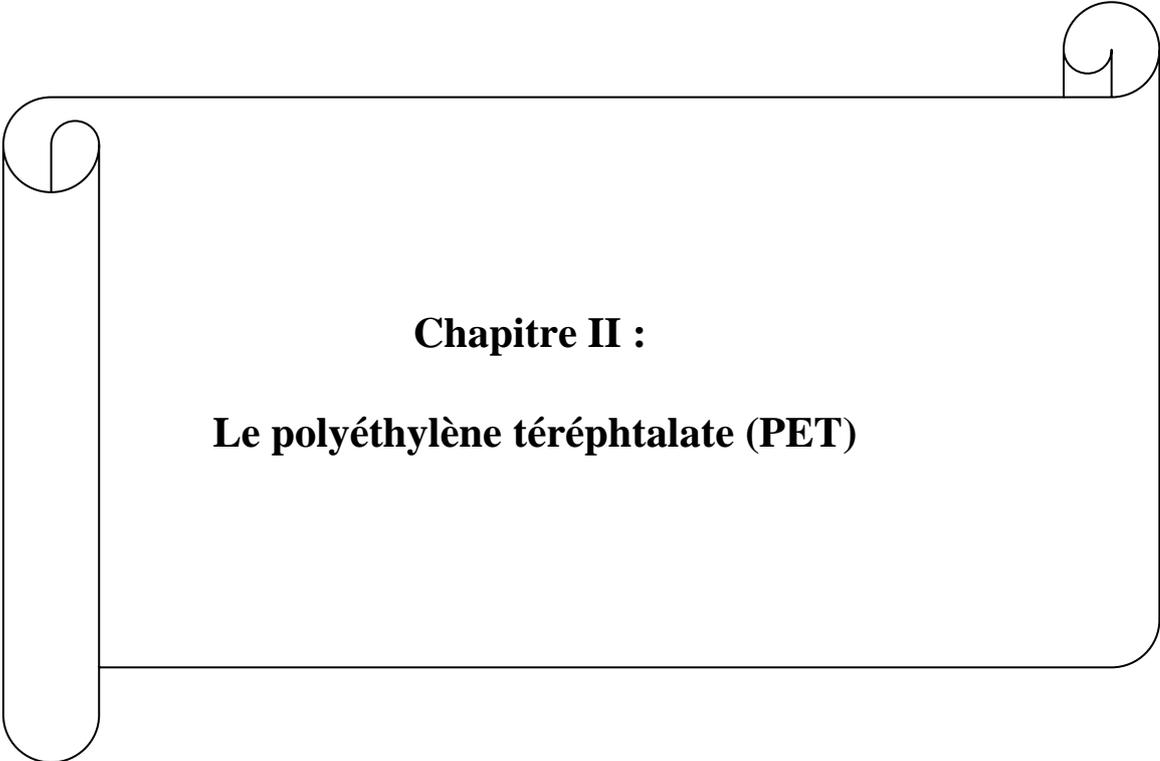
Seulement 25% des déchets plastiques sont recyclés !

L'Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Energie (Ademe) estimait les déchets de matières plastiques en France à 2 500 000 tonnes annuelles en 2009. Ces plastiques sont mal recyclés et valorisés sur le territoire avec 45 % de déchets plastiques mis en décharge : sur 3 millions de tonnes de déchets, 1,4 million est mis en décharge, 506 000 tonnes (17 %) sont recyclées (retransformées en matières plastiques) et 1,1 million de tonnes sont valorisées (utilisées comme combustible).

Par contre en Suisse la décharge du plastique est interdite dont le taux de valorisation est presque 100%. (Roselyne Messal, 2013) .

I.8 Conclusion

Ce chapitre a été dédié pour identifier les grandes familles des plastiques qui existent, leurs natures ainsi leurs différentes caractéristiques. Le prochain chapitre va être consacré à la présentation des principes ainsi que les différents procédés relatifs au PET (polyéthylène téréphtalate).



Chapitre II :
Le polyéthylène téréphtalate (PET)

Chapitre II : Le polyéthylène téréphtalate (PET)

II .1 Le Polyéthylène téréphtalate

Le polyéthylène téréphtalate (PET) est un polyester linéaire dont l'unité de répétition est représentée par la Figure II .1 suivante.

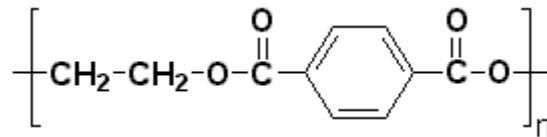


Figure II .1 : Motif de répétition du polyéthylène téréphtalate

La présence d'un groupement rigide dans le squelette de la chaîne a une importance capitale sur la cohésion du polymère. Sa structure chimique lui confère ainsi une grande rigidité.

Le PET peut être produit par différentes voies de synthèse. Nous n'en décrivons que les principales utilisées dans l'industrie (E. MARECHAL et *al.*, 2002) .

- l'estérification de l'acide téréphtalique et de l'éthylène glycol ;
- la transestérification du diméthyle téréphtalate et de l'éthylène glycol.

Ces deux réactions se déroulent en deux étapes : la pré-polycondensation et la polycondensation. Mais la dernière voie de synthèse est la plus couramment utilisée car la purification du polymère est plus facile.

II .2 Procédés de fabrication du PET

Les deux principaux procédés de fabrication du PET dans l'industrie sont : la synthèse à partir de l'acide téréphtalique et l'éthylène glycol et la synthèse à partir du diméthyltéréphtalate et l'éthylène glycol. Ces deux procédés comportent deux étapes :

La première est la synthèse du monomère bis β-hydroxyéthyltéréphtalate (BHET),

La deuxième est la polycondensation de ce dernier (P.Y.PENNARUN, 2001) .

II .2.1 Synthèse à partir de l'acide téréphtalique et de l'éthylène glycol

Le schéma réactionnel suivant résume cette synthèse :

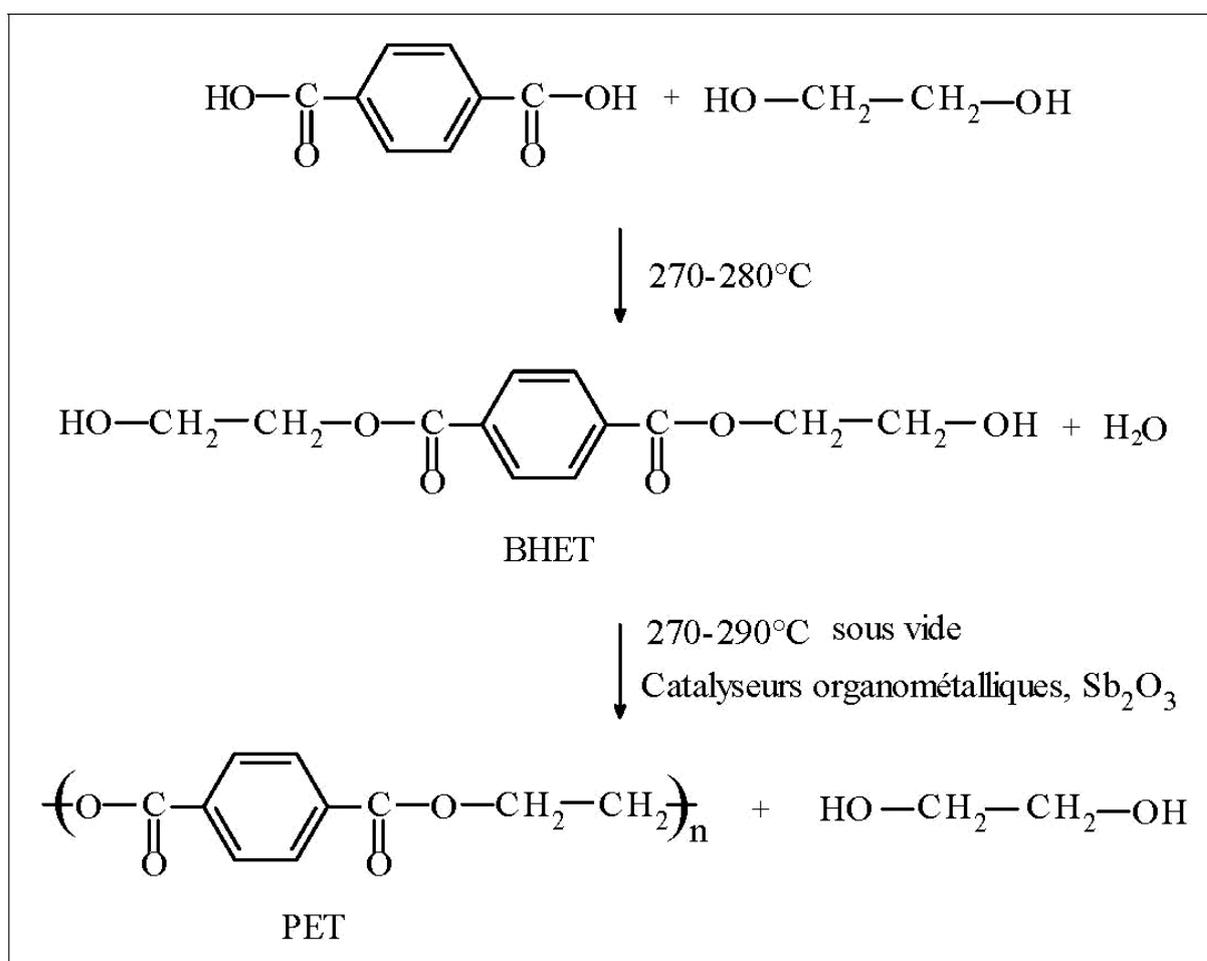


Figure II .2 : Synthèse du PET à partir de l'acide téréphtalique et de l'éthylène glycol (P.Y.PENNARUN, 2001) .

II .2.2 Synthèse à partir du diméthyltéréphtalate et de l'éthylène glycol

Ce second procédé se décompose selon le schéma réactionnel suivant :

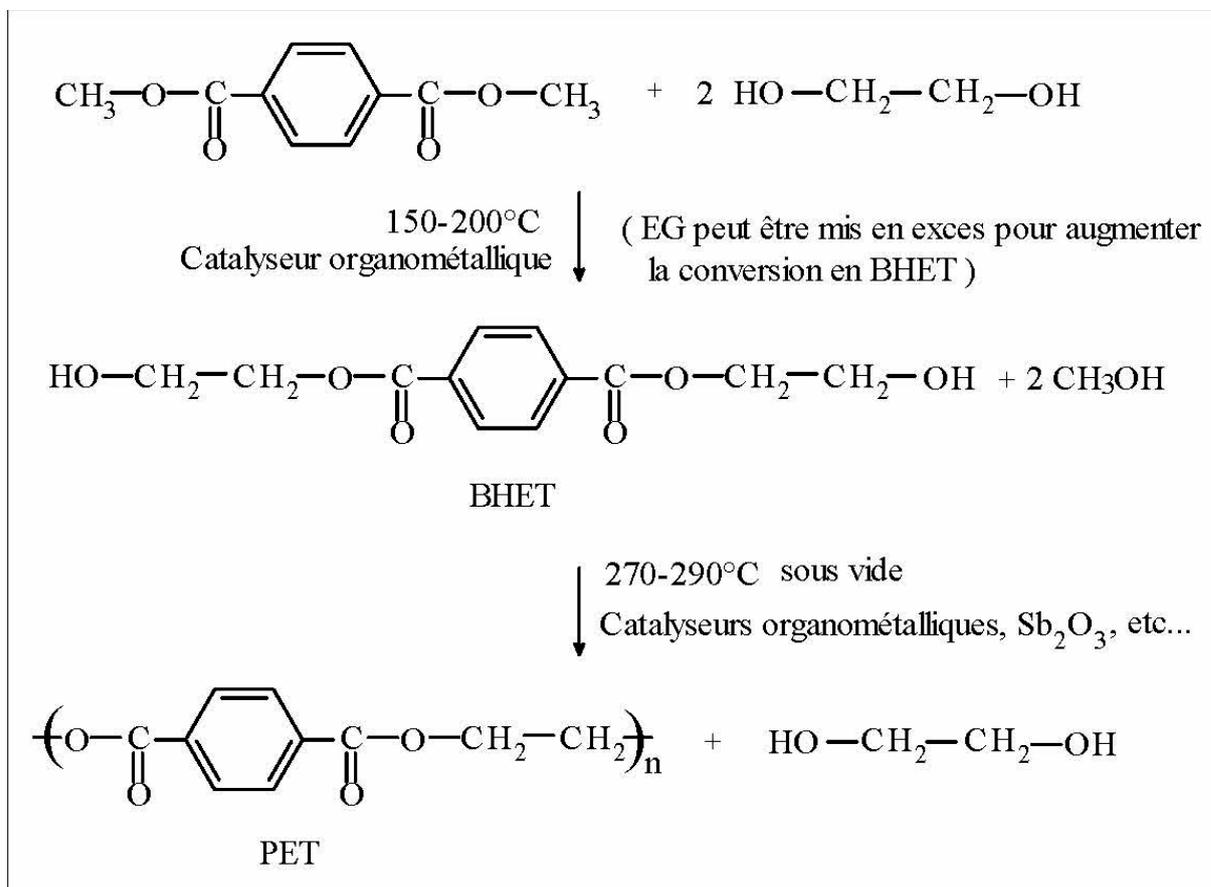


Figure II .3 : Synthèse du PET à partir du diméthyltéréphtalate et de l'éthylène glycol
(P.Y.PENNARUN, 2001) .

La synthèse du PET consiste donc, dans les deux cas, en une polycondensation du BHET qui est une réaction réversible.

L'utilisation de catalyseurs permet non seulement d'augmenter la vitesse de la polycondensation mais entraîner par la suite des réactions de dégradation (P.Y.PENNARUN, 2001) .

II .3 Principales propriétés du PET

Le PET possède des caractéristiques spécifiques en termes :

- Transparence,
- Brillance,
- Résistance aux chocs,
- Cristalline, légèreté, solidité et longue durée de vie,
- Résistance à la traction,
- Résistance à la pression et aux gaz (N. MEDJDOUB, 2011) .

II.4 Propriétés physiques**II .4.1 Viscosité**

L'une des propriétés les plus importantes du PET est sa viscosité intrinsèque. Elle dépend de la longueur des chaînes de polymères. Plus les chaînes sont longues, plus le matériau est dur et plus sa viscosité augmente. Selon sa viscosité, le PET ne va pas être utilisé dans le même domaine.

(Le tableau II .1) représente les applications du PET en fonction de sa viscosité :

Tableau II .1 : Application du PET en fonction de sa viscosité (J.P. QUENTIN, 2004) .

Application	Indices de viscosité (ml/g)
Fibres	55-68
Films	57-66
Bouteilles	72-85
Fils industriels	80-90

II .4.2 Cristallisation

La température de cristallisation du PET est un autre facteur qui a son importance pour la fabrication de fibres. En effet, on cherche à élever cette température au maximum. La température de cristallisation du PET est variable (160-180°C) et peut dépendre de certains facteurs (G. LI. S.L. YANG et *al.*, 2005) [12]. Ont montré par exemple, que la température de cristallisation augmentait si le PET est branché, en comparaison avec un PET linéaire, et peut alors atteindre 190°C.

D'autre part, les propriétés barrière du PET augmentent avec le taux de cristallinité, que se situe en général entre de 20-50 % . Il est cependant possible d'obtenir des taux des cristallinité allant jusqu' à 90 % grâce à traitements sous pression (U. KONCKE et *al.*, 1996) .

Le tableau II.2 suivant présente quelques caractéristiques du PET suivant la structure cristalline considérée :

Tableau II .2 : Propriétés physiques et thermiques du PET (M. RULE, 1987)

Propriétés	PET amorphe	PET semi- cristallin
Masse volumique (g/cm ³)	1,335	1.455 – 1.515
Transition vitreuse (°C)	67	81 – 125 (orienté)
Indice de réfraction	1,576 (25°C)	1.64 (23°C)
Température de fusion à l'équilibre thermodynamique (°C)	-	280°C

II .5 Vieillessement et dégradation

La mise en température du PET a pour conséquence de favoriser les réactions de dégradation et de condensation, responsables respectivement de la rupture des chaînes macromoléculaires ainsi que du réarrangement structural. Tandis que le vieillissement physique du matériau peut avoir lieu à l'état solide, la dégradation chimique du matériau a essentiellement lieu en température (dégradation thermique), en particulier pendant la mise en œuvre à l'état fondu du polymère : en présence d'eau dans le matériau ou d'oxygène dans l'extrudeuse, les molécules se dégradent très rapidement par

dégradation hydrolytique et thermo-oxydative respectivement. Nous avons décrit ci-après les mécanismes caractéristiques de chacune de ces dégradations.

II .5.1 La dégradation hydrolytique

Elle se caractérise par un processus réversible (hydrolyse/polycondensation) de coupures de chaînes en présence d'eau, et par la formation de groupements terminaux acides carboxyliques et alcools (Figure II .23).

Cette réaction est, pour des temps d'exposition longs, autocatalyse par la formation d'extrémités de chaînes acides carboxyliques. La scission des chaînes macromoléculaires est localisée dans la phase amorphe du matériau, la phase cristalline étant insensible à l'hydrolyse jusqu'à un certain degré d'avancement de la dégradation (A. LAUNAY et *al.*, 1994) .



Figure II .4 : Dégradation hydrolytique du PET

L'hydrolyse des chaînes macromoléculaires peut être suivie par le dosage des fins de chaînes acides carboxyliques. Mais ces fonctions sont également créées par dégradation thermique. C'est pour cela que l'étude de la sensibilité hydrolytique du matériau est effectuée sur échantillon solide à 100°C et humidité contrôlée (H. ZIMMERMANN, 1979) .

Le taux de dégradation obtenu par dégradation hydrolytique est bien plus important que celui mesuré pour les dégradations thermique et oxydative (A. LAUNAY et *al.*, 1994) .

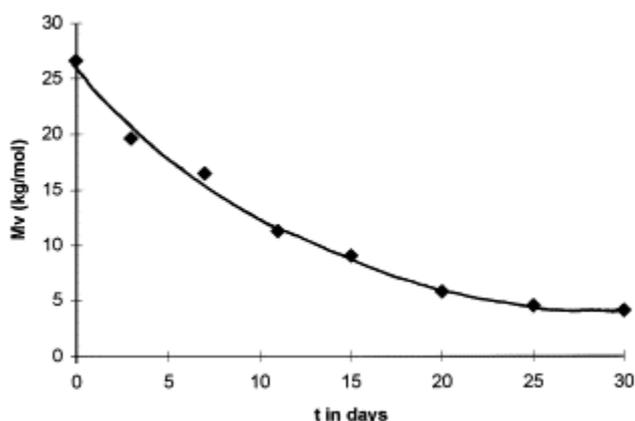


Figure II .5 : Evolution de la masse molaire moyenne (déterminée par viscosité intrinsèque) avec le temps d'exposition d'un échantillon de PET dans l'eau à 100°C

D'après (A. LAUNAY et *al.*, 1999) .

Comme la montre la (Figure II.24) ci-dessus, et pour de faibles taux de conversion, la cinétique d'hydrolyse est d'ordre nul. Mais pour de forts taux de conversion, la masse molaire tend vers une valeur asymptotique D'après (A. LAUNAY et *al.*, 1999).

Comme cette valeur de masse viscosimétrie est très proche de la masse molaire moyenne en poids M_w , il peut être considéré que la scission de chaîne ayant lieu au cours de l'hydrolyse est statistique. Au cours de cette dégradation, le matériau initialement amorphe peut cristalliser : c'est la chimicristallisation (A. BALLARA et *al.*, 1989) . Celle-ci se produit lorsque le matériau est exposé à un fort taux d'humidité et à une température supérieure à 80°C. La perte de masse liée à l'hydrolyse du matériau est moins rapide que sa cristallisation (A. LAUNAY et *al.*, 1999) . Ce qui prouve que les chaînes amorphes sont hydrolysées en premier ; la dégradation de la phase cristalline n'étant possible que pour des temps de dégradation longs, lorsqu'une grande majorité des chaînes amorphes ont été touchées.

L'effet d'un recuit du polymère au-dessus de sa température de transition vitreuse a également été étudié par (N.S. ALLEN et *al.*, 1991) . Dans le cas de la dégradation de films de PET amorphes.

La présence d'eau a un effet de plastification permettant une plus grande mobilité moléculaire. Ainsi, une augmentation importante de la cristallinité a pu être observée dès les premières coupures de chaînes, au début du processus de dégradation.

L'hydrolyse constitue donc un danger réel pour le matériau, car la présence d'un faible taux d'humidité a des conséquences catastrophiques sur ses propriétés.

Les conditions de mise en œuvre et/ou de stockage du PET sont donc importantes et nécessitent des précautions en termes de température et de taux d'humidité.

Une étude de séchage suivie par des analyses Karl-Fischer (détermination de la quantité d'eau présente dans le matériau) et rhéologique (détermination de la viscosité du matériau à l'état fondu) peut permettre d'évaluer l'impact du taux d'humidité, même très faible, sur l'évolution de la masse molaire du matériau au cours de sa mise en œuvre.

II .5.2 Dégradation thermique

Ce type de dégradation est très souvent étudié sous vide ou en atmosphère neutre mais jamais en milieu oxygéné. Il s'agit d'une scission de la chaîne macromoléculaire au niveau des fonctions esters, qui a pour conséquence de former des fins de chaînes vinylesters et acides carboxyliques.

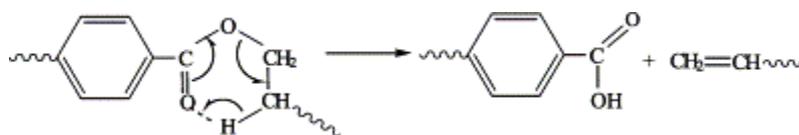


Figure II .6 : Dégradation thermique par rupture ionique

Cette dégradation est accentuée par la présence de catalyseurs métalliques utilisés lors de la transestérification ou de la polycondensation. En ce qui concerne la nature de cette rupture de chaînes, certains auteurs pensent qu'il s'agit d'une rupture homolytique (I. C. MC NEILL et *al.*, 1991) .d'autres pensent qu'il s'agit plutôt d'une rupture ionique (H. ZIMMERMANN, 1979) .

La dernière hypothèse semble la plus vraisemblable, puisque la présence de radicaux libres au cours de cette réaction n'a pas été démontrée (G. MONTAUDO, 1993) .

Comme le montre (Figure II .6) La dégradation thermique est caractérisée par la formation d'un intermédiaire cyclique (réaction catalysée par la présence d'ions métalliques dans le matériau), puis par un transfert d'hydrogène provoquant la scission de la chaîne .

A partir d'un certain degré de dégradation, les groupements vinylesters obtenus par scission de chaîne forment des aldéhydes (acétaldéhyde et formaldéhyde), qui sont difficilement quantifiables par dosage car piégés dans la matrice semi-cristalline insoluble : le dosage de ces substances se faisant par gonflement et non dissolution du polymère dans un solvant, les molécules d'aldéhydes peuvent être piégées dans la zone cristalline du matériau qui gonfle peu en présence de solvants (F. VILLAIN et *al.*,1995). Ces aldéhydes sont les principaux produits de dégradation du polymère à la température de mise en œuvre (250-300°C).

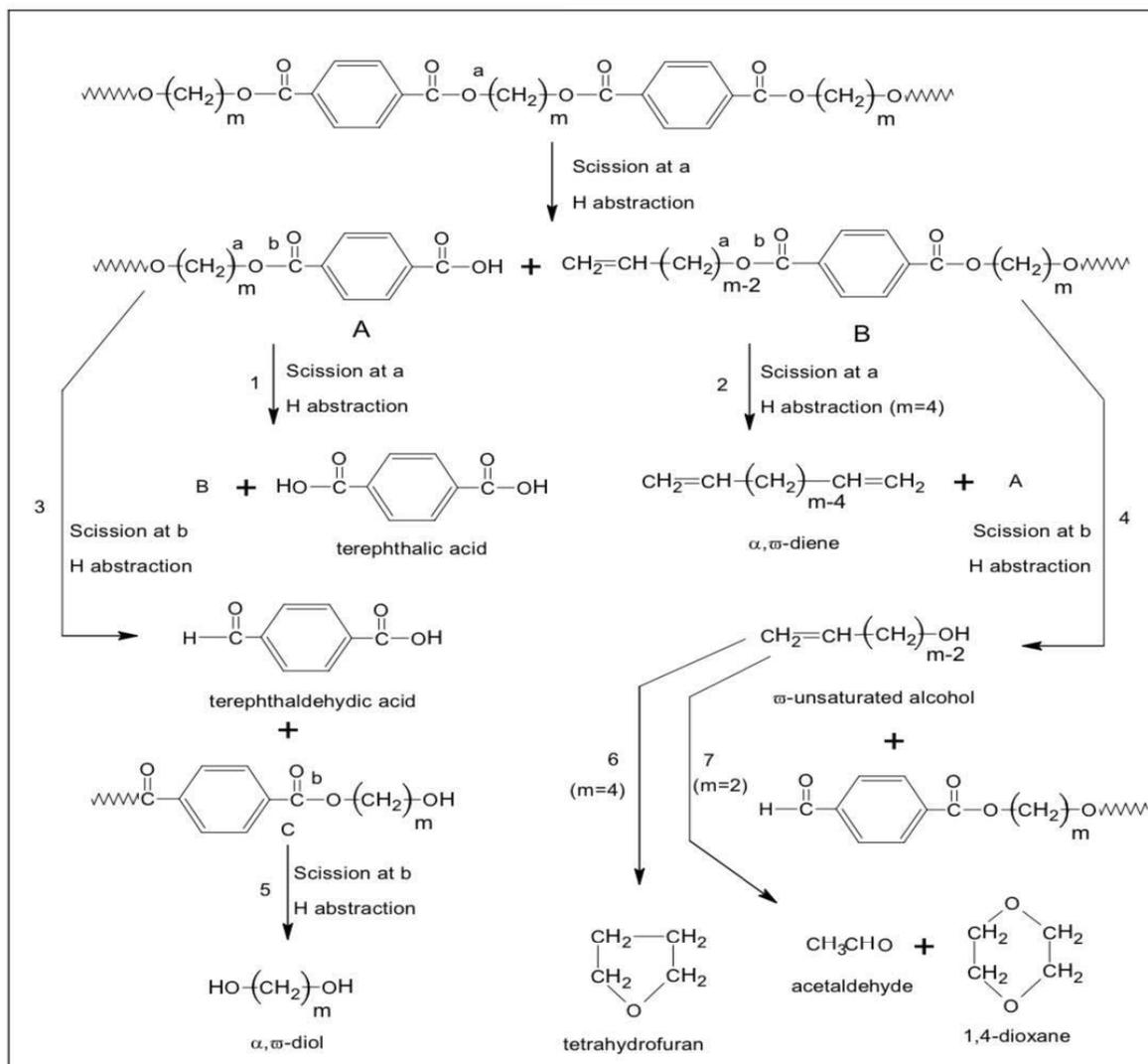


Figure II .7 : Schéma de dégradation des polyesters saturés au cours de leur dégradation thermique

II .5.3 Dégradation thermo-oxydative

La dégradation thermo-oxydative est un processus chimique en boucle fermée qui génère ses propres amorceurs : les hydroperoxydes, formés au niveau des méthylènes et dont la décomposition se traduit par une scission de chaîne homolytique pouvant entraîner une accélération irréversible de la dégradation du matériel.

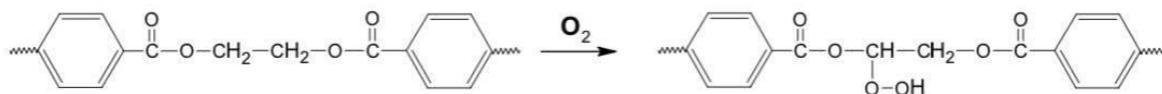
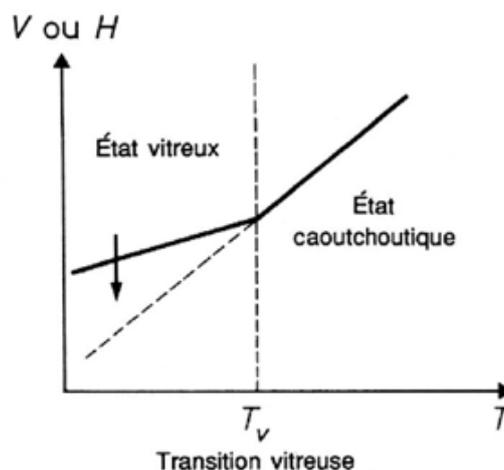


Figure II .8 : Dégradation thermo-oxydative du PET

Ce processus chimique relativement complexe induit une modification de structure irréversible du matériau, et réduit fortement ses possibilités de mise en œuvre. Certain auteur R.ASSADI et al. et F.P. LA MANTIA et al. M. PACI et al. Ont montré que la dégradation thermo-oxydative est la source principale de problèmes lors de la mise en œuvre du PET. (R. ASSADI et *al.*, 2002) (R. ASSADI et *al.*, 2004) (M. PACI et *al.*, 1998) .

II .5.4 Vieillessement physique

Le phénomène de vieillissement physique (ou vieillissement structural) d'un polymère à l'état vitreux est caractérisé par la relaxation graduelle des chaînes jusqu'à atteindre un état d'équilibre de plus basse énergie. De nombreuses propriétés physiques et mécaniques sont affectées par cela.



La flèche verticale symbolise l'évolution vers l'équilibre.

à $T > T_v$, le polymère est à l'**état caoutchoutique** avec un coefficient de dilatation volumique $\alpha_r \approx (5 \text{ à } 7) \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

à $T < T_v$, le polymère est à l'**état vitreux**, son coefficient de dilatation volumique α_v est de l'ordre de $(1,5 \text{ à } 3,5) \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

Figure II.9 : Caractéristique énergétique du vieillissement physique

D'après (J. VERDU, 1990) .

Il dépend essentiellement des traitements thermiques subis par le matériau ainsi que de son état structural initial. Par exemple, un choc thermique trop important pendant la transformation ou la conversion du matériau peut générer des dilatations différentielles liées à des gradients de température dans l'épaisseur de l'échantillon. C'est un processus thermoréversible, car il suffit de chauffer le matériau au-dessus de sa température de transition vitreuse et de le refroidir lentement pour retrouver un état d'équilibre énergétique.

L'absorption de solvants par le polymère est également un mécanisme de vieillissement physique. Les solvants ont, la plupart du temps, des interactions purement physiques avec le matériau, les interactions chimiques conduisant à une augmentation de la masse sèche de façon irréversible.

Le vieillissement quel qu'il soit est essentiellement influent sur les propriétés à l'impact du matériau, peu sur sa rigidité, sauf si ses caractéristiques cristallines sont très modifiées. Si le polymère est refroidi de façon trop brutale sous sa température de transition vitreuse, l'augmentation de viscosité, et donc la diminution de la mobilité des chaînes, les maintient à un état de non équilibre de haute énergie : elles occupent ainsi un volume plus important. La relaxation du volume libre est obtenue avec des temps très longs étant donné la faible mobilité des chaînes de polymère et peut entraîner des complications mécaniques au moment du retrait notamment lorsque l'application est d'ordre technique (longue durée, conditions extrêmes d'utilisation).

II .6 Domaines d'application du PET

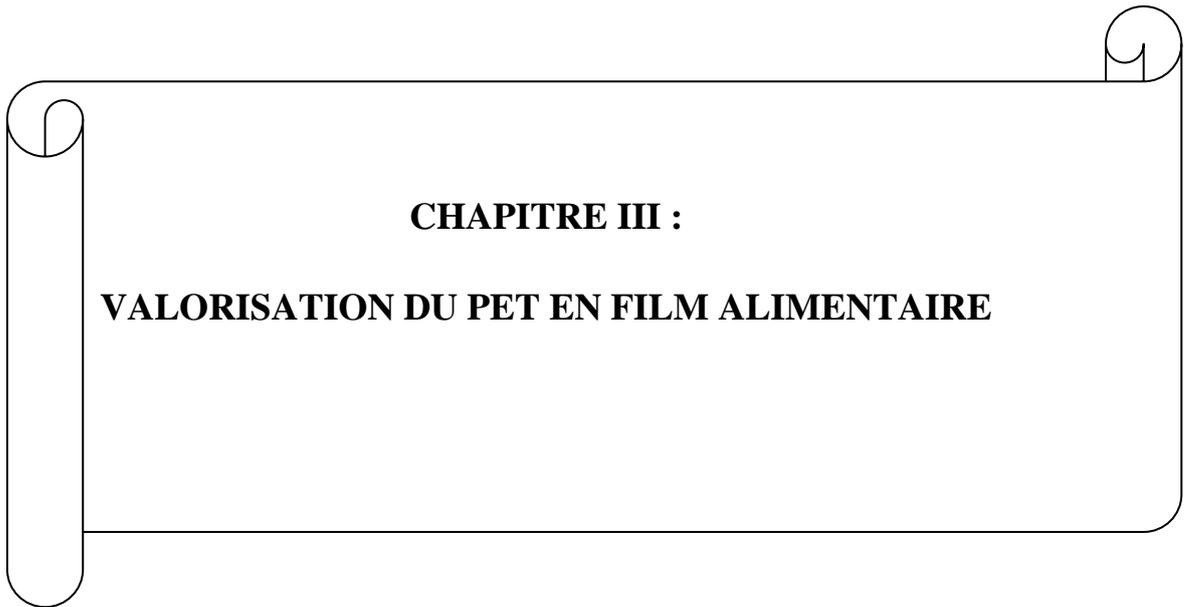
Généralités

La PET se retrouve dans trois domaines d'application principaux : les fibres, les films, les bouteilles. Les propriétés et caractéristiques moléculaires du PET dépendent énormément de son application. Ainsi, la sélection du grade approprié pour telle ou telle application est déterminée par la mesure de sa viscosité intrinsèque, dont la valeur est directement liée à la masse moléculaire du matériau.

Tableau II .3 : Viscosité intrinsèque du PET en fonction de son application

PET	$[\eta]$ (dL/g)
Fibres	
• textiles	0,40 – 0,70
• techniques	0,72 – 0,98
Films	
• bi-orientés	0,60 – 0,70
• pour thermoformage	0,70 – 1,00
Bouteilles	
• pour eau	0,70 – 0,78
• pour boissons gazeuses	0,78 – 0,85

La production de bouteilles (utilisées dans l'alimentaire en grande partie) nécessite l'utilisation d'un PET à haut poids moléculaire. Cela s'explique en partie par le procédé de fabrication (extrusion-soufflage, bi-étirage), et par la nécessité d'obtenir des propriétés barrières suffisantes pour ce type d'application, souvent liée à l'emballage de boissons. Les chaînes de PET à haut poids moléculaires vont permettre un 'maillage' plus fin des chaînes après bi-étirage qui limitera la diffusion de molécules gazeuses de l'extérieur vers le contenu et vice versa. Nous allons détailler spécifiquement ci-après les procédés de mise en œuvre ainsi que les caractéristiques des bouteilles en PET utilisées dans l'emballage de boissons.



CHAPITRE III :
VALORISATION DU PET EN FILM ALIMENTAIRE

CHAPITRE III : valorisation du PET en film alimentaire**III .1 Recyclage des bouteilles en PET**

Les bouteilles en PET sont produites à partir de dérivés du pétrole. Au niveau mondial, la fabrication de bouteilles en PET requiert chaque année 2,7 millions de tonnes de ce polymère.

La nécessité de recycler cette matière est devenue une priorité à cause du cout élevé de la matière première (H. WIDEN et *al.*, 2005) .

Par définition la valorisation est une opération conduisant à la réintroduction d'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 (D. PASZUN et *al.*, 1997) .

III .2 Modes de valorisation des matières plastiques**III .2.1 Valorisation énergétique**

Comme nous l'avons indiqué précédemment, la valorisation énergétique par incinération consiste à sécher les déchets et à les soumettre à une combustion totale à des températures comprises entre 800 et 1000°C. Elle produit principalement du dioxyde de carbone CO₂ et de l'eau H₂O. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du PET varie entre 13Mg/kg (déchets d'emballage) et 45 Mg/kg (matériau pur), et 29 MJ/kg pour le charbon, L'énergie dégagée peut donc être récupérée sous forme de chaleur ou d'électricité (V. CHAFFRAIX, 2002) .

III .2.2 Valorisation de la matière : recyclage chimique

Cette voie de recyclage permet la dépolymérisation partielle ou complète du PET en monomères ou oligomères. Ces produits de dégradation sont ensuite réutilisés pour la synthèse d'un nouveau PET ou d'autres polymères comme les polyuréthanes ou les polyesters insaturés.

Les agents de dépolymérisation sont multiples : l'eau (hydrolyse), le méthanol (méthanolyse), l'éthylène glycol (glycolyse) et le butanediol (diolyse). Les procédés de dépolymérisation les plus communs aujourd'hui sont la glycolyse et la méthanolyse.

L'hydrolyse et la méthanolyse permettent de régénérer les monomères (acide téréphtalique, diméthyle téréphtalate et éthylène glycol) tandis que la glycolyse et autre solvolyse permettent simplement de produire des oligomères. Il est également possible de convertir chimiquement les déchets en modifiant leur structure pour des applications particulières, telle que la production de polyuréthanes (aminolyse) ou de polyesters insaturés. L'aminolyse consiste à dépolymériser le PET à l'état solide dans une solution aqueuse contenant des amines primaires, et permet la formation de diamides, d'acide téréphtalique et d'éthylène glycol. Les diamines formées sont ensuite utilisées comme monomères pour la production de poly (ester amides) ou polyuréthanes via des réactions avec des isocyanates. L'utilisation du PET comme source de monomères (par dépolymérisation et modification chimique) pour la production d'intermédiaires chimiques est limitée en volume. Toutefois, la commercialisation de ces intermédiaires semble connaître une augmentation relativement importante selon de récentes études économiques.

Après dépolymérisation, les monomères et/ou oligomères sont purifiés par distillation sous vide et repolymérisés avec de l'éthylène glycol pour donner du PET. Le polymère obtenu peut ensuite être utilisé pour la fabrication d'emballages alimentaires. L'avantage est qu'il n'est pas nécessaire de trier le PET avant transformation, et qu'il est possible d'utiliser différents grades de PET sans que cela n'ait d'influence sur les produits obtenus. Mais le procédé de transformation génère un coût élevé. En ce qui concerne la production de polyuréthanes et de polyesters insaturés, l'intérêt de ce type de produit est croissant puisque l'utilisation de polyesters insaturés à base d'acide téréphtalique issu du recyclage du PET permet d'obtenir un polymère de plus grande résistance mécanique. Les applications sont également nombreuses, notamment dans l'automobile pour la fabrication de SMC5 (résine polyester insaturé renforcées par des fibres de verre et chargée de carbonate de calcium CaCO_3).

III .2.3 Valorisation de la matière : recyclage mécanique

La valorisation des plastiques par voie fondue est une méthode simple, peu dommageable pour l'environnement et demandant peu d'investissements par rapport au recyclage par

chemolyse .

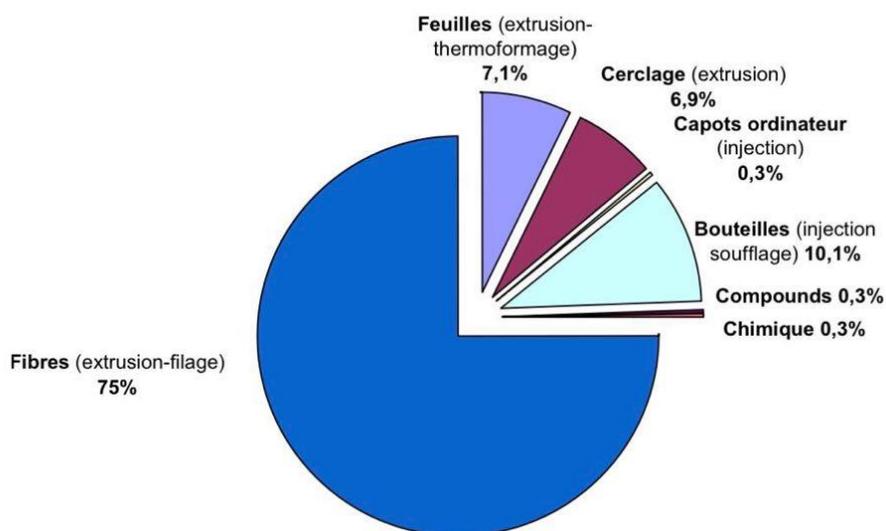


Figure III .1 : Utilisation des paillettes de PET recyclé en 2004

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 responsables de la diminution de masse molaire de la résine recyclée. Les scissions de chaînes sont responsables de la diminution de viscosité du matériau et donc de la perte de ses propriétés mécaniques (cf. tableau 5), de la production d'oligomères cycliques et linéaires, de l'augmentation du taux de cristallinité du polymère pour un même procédé de transformation, du jaunissement de la résine et parfois même du blocage de l'extrudeuse dû à l'oxydation en température des chaînes dans certaines conditions de mise en œuvre.

Malheureusement cette valorisation a ses limites car le matériau concerné ne peut être indéfiniment recyclé à cause de sa dégradation accélérée par la présence de contaminants et perd progressivement ses propriétés.

Tableau III .1 : Propriétés mécaniques d'échantillons de PET vierge et recyclé obtenues par injection

Propriétés	PET vierge	PET recyclé
Mw (kg/mol)	80 - 28,5	81,6 - 33,4
Module d'Young(MPa)	2140 – 1610	3000 - 1430
Contrainte à la rupture(MPa)	50 – 47	30- 24
Allongement à rupture(%)	40 - 3,2	270 – 57
Force à l'impact (J/m, ASTM D256)	90 – 12	20 – 15

III .3 Etapes du recyclage

Le recyclage des bouteilles plastiques s'effectue en plusieurs étapes, toutes essentielles pour une éventuelle transformation industrielle. En voici le détail :

- **La collecte**

Elle s'effectue de plusieurs façons. De plus en plus de conteneurs spécifiques sont mis à la disposition des consommateurs pour faciliter le tri. Les déchets récupérés par catégorie sont ensuite transportés jusqu'en centre de tri.

- **Le tri**

Il intervient à plusieurs étapes de la chaîne de recyclage. Les consommateurs tout d'abord peuvent effectuer un tri en séparant les matières plastiques des autres types de matériaux. En centre de tri, la séparation des différentes matières plastiques se fait manuellement par des opérateurs selon trois catégories : le PEhd, le PET clair (transparent ou légèrement bleuté), le

PET foncé (coloré). La séparation du PET et du PVC est très problématique, car ces deux matériaux ont des densités proches. M. PACI et F.P. LA MANTIA, ont ainsi démontré que la présence de 100 ppm de PVC dans un lot de PET recyclé peut entraîner une accélération de sa dégradation (M. PACI et *al.* 1999) .

Les PET pollués par la présence de PVC montrent en effet une fragilité mécanique importante due à la formation de « points noirs » issus de la dégradation du PVC pendant la mise en œuvre (cf. figure 26). Cette fragilité est une conséquence de la déshydrochlorination du PVC autour de ces zones polluées. Cela explique pourquoi la séparation de ces deux polymères est une nécessité. (A. PAWLAK *et al.*, 2000).

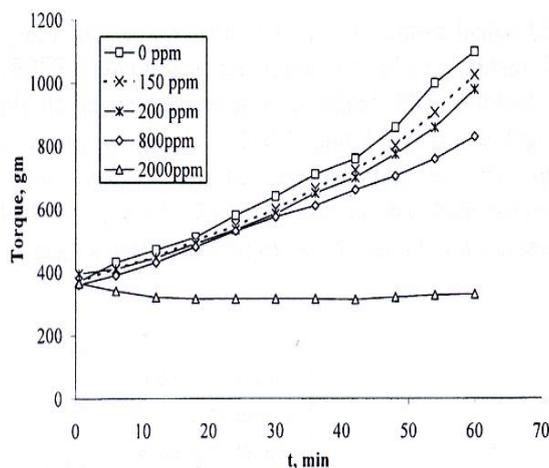


Figure III.2 : Evolution du couple de torsion en fonction du temps pour un PET contenant différentes quantités de PVC Analyses effectuées sous azote, à 260°C avec une vitesse de cisaillement de 130 tr/min D'après M. PACI et al. (M. PACI *et al.*, 1999).

La séparation par flottation est actuellement la plus utilisée mais elle ne permet pas une séparation optimale. Des techniques plus coûteuses, comme les analyses proche infrarouge ou rayons X sont préférées parce que plus performantes, mais la séparation intégrale de ces deux polymères reste difficile. D'autres techniques de séparation-qui restent pour le moment des techniques exclusivement expérimentales -ont été mises au point pour différencier la densité de ces deux polymères dans différentes conditions, notamment sous CO₂ supercritique ou dans l'éthylène glycol à 194°C. Quoi qu'il en soit, il est possible aujourd'hui d'obtenir un lot de PET recyclé contenant moins de 100 ppm de PVC. (G.A. SERAD *et al.*, 1995),(T. RIECKMANN, 1995) .

- **Le broyage**

La découpe des bouteilles est souvent réalisée sous eau pour permettre une séparation des différentes matières plastiques (bouchons et bouteilles par exemple) ainsi que des contaminants (emballages papier). La taille des paillettes obtenues – caractéristique de la surface spécifique du matériau – est un paramètre important de la transformation mécanique du PET.

- **Lavage et séchage**

Le lavage s'effectue en plusieurs étapes, son but étant d'éliminer un maximum d'impuretés comme les adhésifs, le papier, etc. afin d'obtenir un produit exempt de toute contamination.

Le premier lavage s'effectue dans une eau légèrement basique (80°C, 2% de NaOH et un détergent). Il est suivi d'un lavage à froid permettant d'éliminer les traces de NaOH présentes dans le polymère et susceptibles de catalyser le processus de dégradation hydrolytique du PET.

L'étape de séchage qui suit ce premier lavage est très importante car le PET ne doit pas contenir plus de 200 ppm d'humidité résiduelle pour éviter toute dégradation hydrolytique catastrophique en cours de transformation. (J. SCHEIRS, 1998) .

Un lavage au solvant est ensuite possible pour éliminer toute trace d'adhésifs ou d'impuretés organiques. Plusieurs solvants peuvent être utilisés, mais le plus commun est le tétrachloroéthylène (TCE). Les paillettes de PET sont ainsi introduites dans un réacteur contenant du TCE à 80°C. Ce solvant est efficace et ne contamine pas le PET car il forme un azéotrope avec l'eau et peut facilement être éliminé par séchage. Mais ce type de lavage est de moins en moins utilisé dans l'industrie du recyclage plastique. Il est supposé que la friction engendrée par le frottement des paillettes entre elles permet d'optimiser l'élimination des résidus de colle. C'est en cela que l'étape de broyage précédente est importante.

- **Purification par dissolution et précipitation**

Ce procédé – qui n'est pas systématiquement appliqué – permet d'obtenir un PET exempt de toute contamination. Les paillettes sont tout d'abord dissoutes dans un bon

solvant du PET (acide benzylique, mélange phénol/tétrachloréthane, o-chlorophénol). Après dissolution complète, le PET est précipité dans un mauvais solvant à savoir le méthanol, puis filtré et séché.

Le polymère ainsi isolé peut subir une polycondensation à l'état solide afin d'augmenter la taille des chaînes et donc optimiser sa reconversion. Ce procédé n'est pas systématiquement présent dans le processus de recyclage, cela dépend essentiellement de l'application finale du matériau recyclé.

III .4 Du 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.

III .5 Le monde de l'emballage

L'usage répandu des plastiques dans les emballages ne s'est toutefois pas produit avant les années 1970. Comme ce fut le cas pour tous les autres matériaux d'emballages, le recyclage des plastiques a connu une évolution dans le temps, mais sur une période beaucoup plus courte. Alors que l'industrie des plastiques recycle ses propres rebuts de fabrication depuis déjà plusieurs années, le recyclage des plastiques post-consommation est relativement jeune.

La production mondiale du plastique destinée à l'emballage s'élève à plus de 300 milliards d'euro par an, avec presque 5 millions de salariés, 100.000 entreprises et un poids économique représentant l'équivalent de 1,5 à 3% du PIB (produit individuel brut) mondial. Dans les pays industrialisés, l'emballage représente en moyenne 2% de la valeur des produits

(7 à 8% en agro-alimentaire) avec une segmentation par matériaux plaçant largement en tête le Papier Carton (34% en valeur, 37% en tonnage), puis le plastique (30% en valeur, 22% en tonnage), le Métal (25% en valeur, 11% en tonnage) et le Verre (6% en valeur, 30% en tonnage). A titre d'exemple, 200 milliards de bouteilles de soda sont vendues chaque année dans le monde. Un cas typique du marché planétaire de l'emballage

montrant comment celui-ci "est devenu une arme vitale pour se démarquer et sortir du lot". Cette évidence est soulignée par l'Institut français de l'emballage et du conditionnement (IFEC) qui confirme que la survie des produits dépend en grande partie de l'emballage et ce d'autant plus, qu'un nouveau produit lancé en grande distribution a seulement une chance sur quatre de passer le cap de la première année (A.J. MÜLLER et al., 1987) .

III .6 Production mondiale d’emballage

Tableau III .2 : Production mondiale d’emballage en 2003 (Goodflow, 2005) .

Région	Pourcentage
Alena	30%
Europe	27%
Japon	17%
Asean	10%
Reste du monde	8%
Mercosur élargi	5%
Australie	2%
Afrique	1%

III .7 Consommation de l’emballage selon les résines

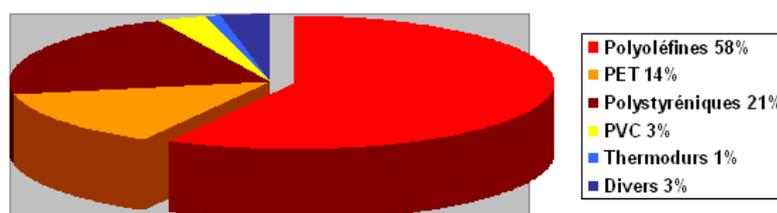
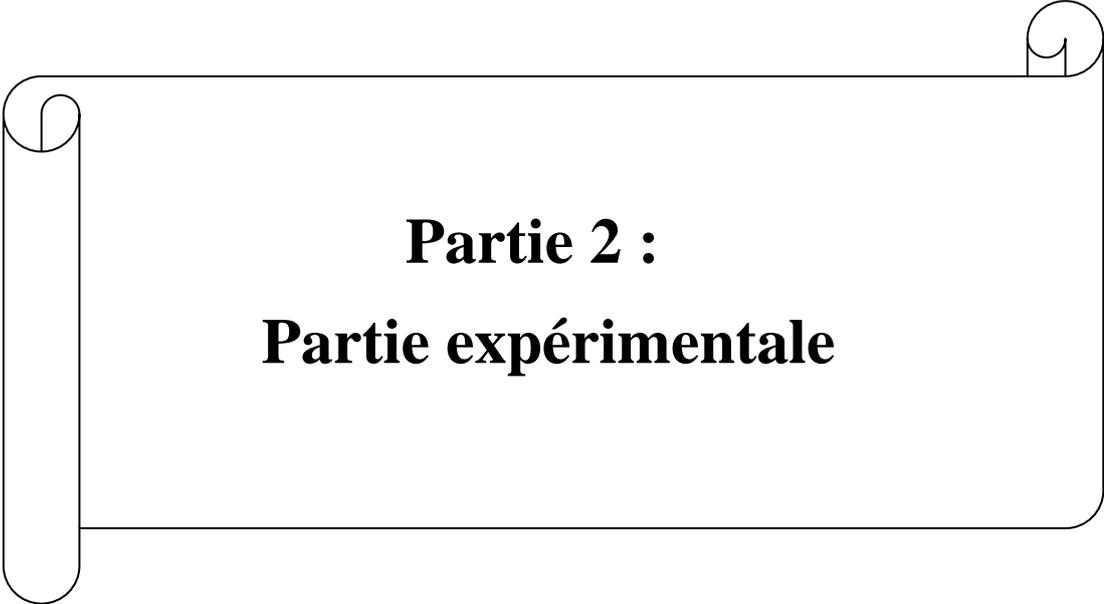


Figure III .3 : Quantités de résines consommées dans l’emballage (Goodflow, 2005) .



Partie 2 :
Partie expérimentale

CHAPITRE IV : Présentation de la zone d'étude

IV .1 Situation géographique

L'entreprise est située au niveau de la zone industriel de la commune de Guerrouaou, groupe de propriété N°60 Section 01 la wilaya de Blida.

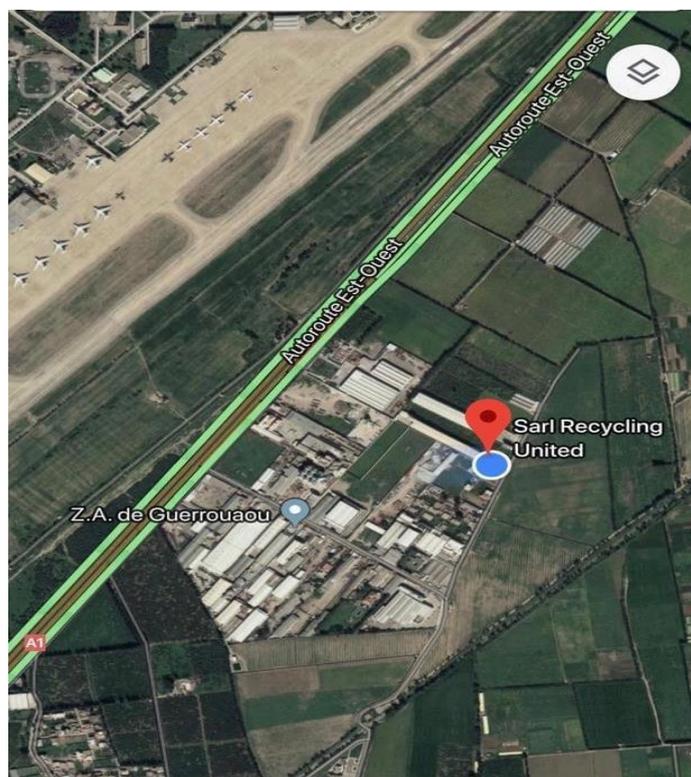


Figure IV .1 : Situation géographique du lieu d'étude

IV .2 Présentation de l'entreprise

RECYCLING UNITED, fondée en 2013, est une entreprise Algérienne, spécialiste dans le traitement et la transformation du plastique PET (Polyéthylène Téréphtalate) et exportation des produits industriels. Avec un effectif qualifié ainsi qu'un matériel de pointe. La société a des produits de très haute qualité à prix concurrentiel et dans les plus brefs délais.

Le capital de l'entreprise est 226 620 000,00DA

IV .3 Structure de l'entreprise :

L'organigramme ci-dessous est un organigramme représentant le personnel de RECYCLING UNITED.

CHAPITRE IV :

Présentation de la zone d'étude

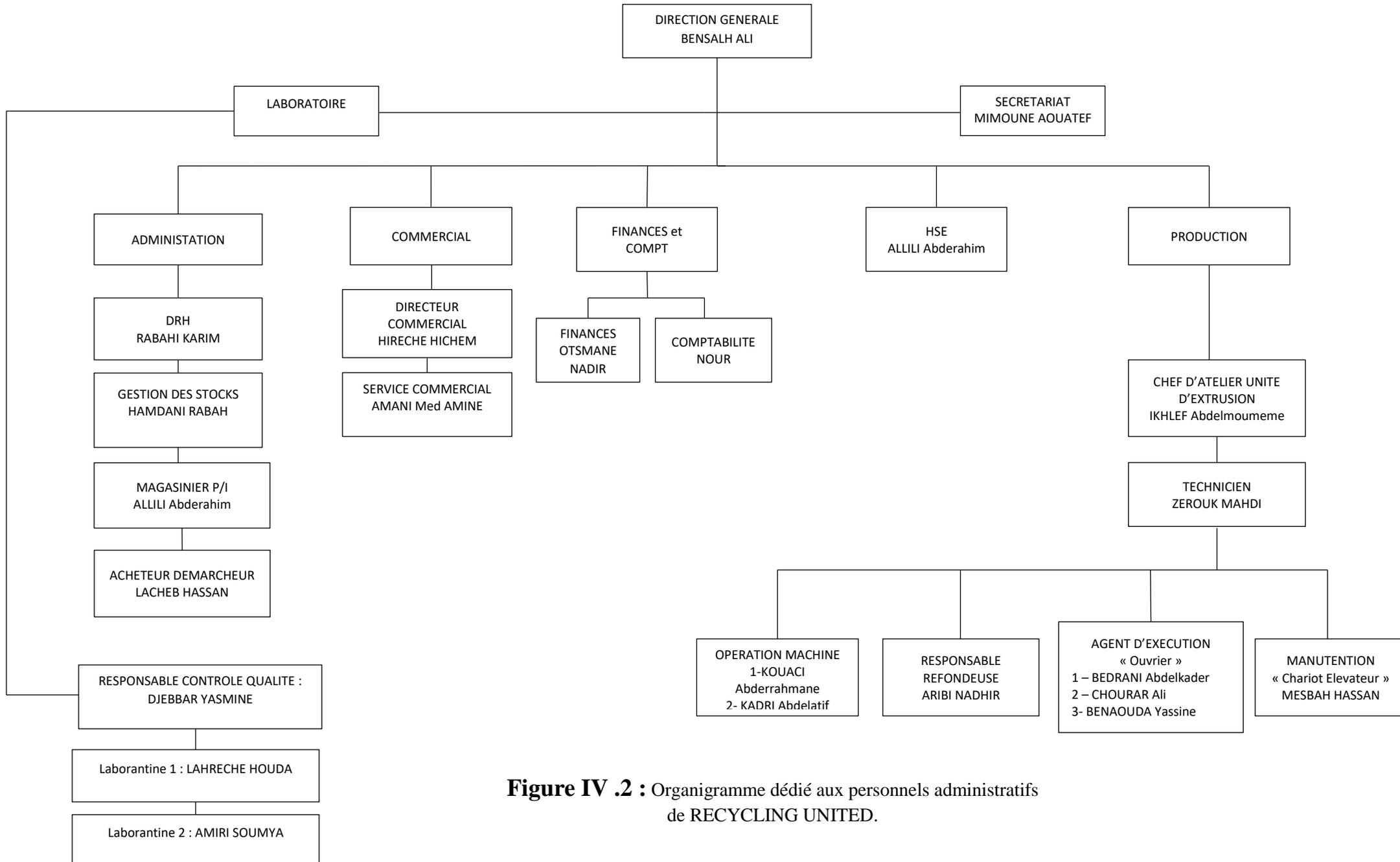


Figure IV .2 : Organigramme dédié aux personnels administratifs de RECYCLING UNITED.

IV .4 Politique d'entreprise :

La politique du recyclage consolidée est composé de deux volets.

IV .4.1 1^{er} volet :

Respect et protection de l'environnement depuis leur création ils se sont engagées à promouvoir et d'intégrer l'économie circulaire en tant qu'un pilier fondateur de « activisme vert ». Cela s'est illustré fortement via leur action en développement durable et protection de l'environnement.

IV .4.2 2eme volet :

Le support des actions concernant le recyclage, dans le cadre de soutenir les mouvements eco-environnement en instaurent une économie ce production 100% verte ainsi par la création de +220 emplois direct tous lié au domaine du recyclage.

IV .5 Les normes de la paillette PET recyclé de l'entreprise :

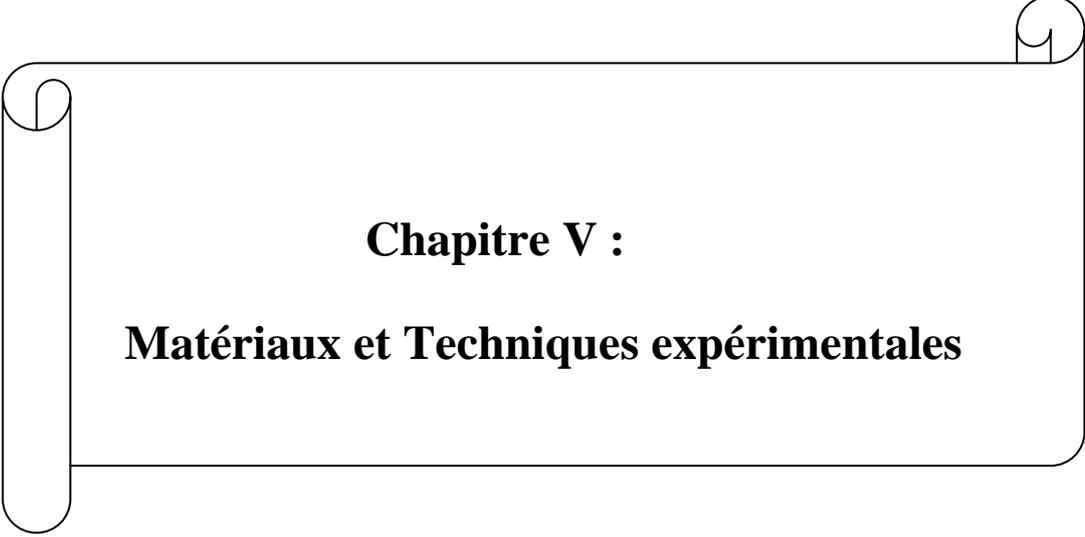
Comme le montre le tableau suivant :

Tableau IV .1 : Tableau des normes de la paillette PET recyclé. (F.awaja et al.,2005)

Propriétés	La norme
Taille des paillettes	0.4mm<D<8mm
Quantité des métaux	<10 ppm
Quantité de pvc	< 50 ppm
Quantité de couleur	<100 ppm
Quantité de pet jaune	<6000 ppm
Quantité de la glu	<4500 ppm
Taux d'humidité	< 1

IV .6 Les activités de l'entreprises :

- Fabrication de bouteilles, flacons, boites, et tout autres contenants en matière plastique,
- Traitement et valorisation de PET,
- Fabrication de film Alimentaire,
- Exportation de Tous les produits industriels en France et en Espagne,



Chapitre V :
Matériaux et Techniques expérimentales

V .1 Problématique et objectif :

L'étude expérimentale proposée dans ce mémoire a été effectuée pour répondre à une problématique bien précise, se posant au niveau de l'entreprise **Recycling United** de Guerrouaou – Blida-, En effet, cette entreprise privée produit des emballages plastiques en PET.

Les épreuves pratique réalisées au niveau de l'unité d'extrusion ont pour objectif de faire des échantillons issus de trois tests de composition (PET / Film broyé) afin d'en extraire la température utilisée, la qualité du film (l'aspect couleur, la résistivité envers une opération de thermoformage). Pour cela l'étude pratique a été orientée de façon à caractériser les produits utilisés pour la production de film alimentaire, c'est-à-dire durant l'extrusion, et pour répondre à la problématique suivante : doit-on modifier les caractéristiques de mise en œuvre lorsque le PET utilisé provient d'une source de matière première recyclée ? Ces modifications sont-elles suffisantes pour un nombre de cycle de mise en œuvre important ?

Pour atteindre notre objectif on a fait une étude qui consiste à étudier 3 échantillons pour déterminer leurs propriétés physico-chimiques pendant la mise en œuvre industrielles.

V .2 Matériel utilisé :**V .2.1 Description des moyens matériels :****• La collecte :**

Les bouteilles en PET sont collectées par des fournisseurs possédant des sites pour le ramassage du plastique et sa mise en forme de balles obtenues après le compactage des bouteilles.

A l'unité Recycling United, les bouteilles sont fournies par : décharge de Blida, CET, et d'autre fournisseurs.

• La balance :

La balance est destinée à la pesée des différents déchets plastiques réceptionnés au niveau de l'unité d'annexe de récupération des déchets plastiques.

L'utilisation de deux moyens de pesée une balance de 1000 kg qui est destinée à la pesée des déchets plastiques ramenés par les petits collecteurs.

Quant à la pesée des grandes quantités des déchets plastique (tonnage important), il s'effectue au niveau de la balance publique dans un but de gain de temps.



Figure V .1 : Photographie montrant la balance de pesage

- **Le tapis manuel :**

C'est l'étape clé dans une stratégie de recyclage. La purification par tri dépend étroitement de la typologie du déchet rencontré et des impuretés et corps étrangers présents dans le flux de déchets. Le tri s'opère avant le broyage et s'effectue d'une manière manuelle. Les impuretés sont généralement le PVC, le PEHD, les bouteilles huilées, les métaux, le PET coloré...etc.



Figure V .2 : Photographie montrant le tapis manuel utilisé

- **Trommel :**

Il est utilisé pour séparer les matériaux et enlever la poussière.



Figure V .3 : Photographie montrant le Trommel utilisé

- **Convoyeur :**

Une machine qui transport le pet.



Figure V .4 : Photographie montrant le convoyeur de tirage utilisé

- **Déchiqueteur :**

Les bouteilles compactées sous forme des balles sont découpées dans un déchiqueteur à vis ou dans un tambour de déballage. Lorsque les déchets sont de taille important (grosses bouteilles), ils sont déchiquetés par des cisailles rotatives pourvues de lames tranchantes comportant des dents ou des pointes. Ces équipements de forte puissance travaillent généralement avec de faibles vitesses de rotation. Le déchiquetage est appelé souvent aussi pré broyage.

- **Presse Hydraulique :**

Elle presse les bouteilles et les fait sortir en balles qui pèse envient 300 kg.



Figure V .5 : Photographie montrant la presse hydraulique et réception de balles 300 kg

- **Broyage :**

Au cours de cette opération, le déchet va subir une réduction de taille (écailles) lui permettant d'accepter les traitements ultérieurs dans de bonnes conditions. Les broyeurs les plus couramment rencontrés sont les broyeurs à couteaux. Plusieurs lames sont fixées sur un rotor. Le broyat obtenu après cette étape est sous forme de paillettes.



Figure V .6 : Photographie montrant PP broyé

- **Bassin séparation par densité (flottation) :**

Il sépare les paillettes du PET et d'autres impuretés par différence de densité. Par exemple, les bouteilles en PET d'eau ou de soda et les bouchons sont en PEHD ou polyoléfines (PE, PP). Le PET et les polyoléfines doivent être séparés car ils sont de nature chimique différente, la présence de polyoléfines dans les paillettes du PET perturbe le procédé de recyclage, entraînant des défauts de qualité des déchets à traiter et voir même l'impossibilité de production finis. Recycling United possède un système de séparation qui se déroule dans un bassin d'eau, doté d'un racleur pour faire débarrasser les impuretés.

(A)

(B)



Figure V .7 : Photographies montrant (A) : Bassin 1 de séparation par densité ; (B) :
Bassin 2 flottation

- **Détecteur de métal :**

Il fait le tri optique par l'élimination des couleurs.

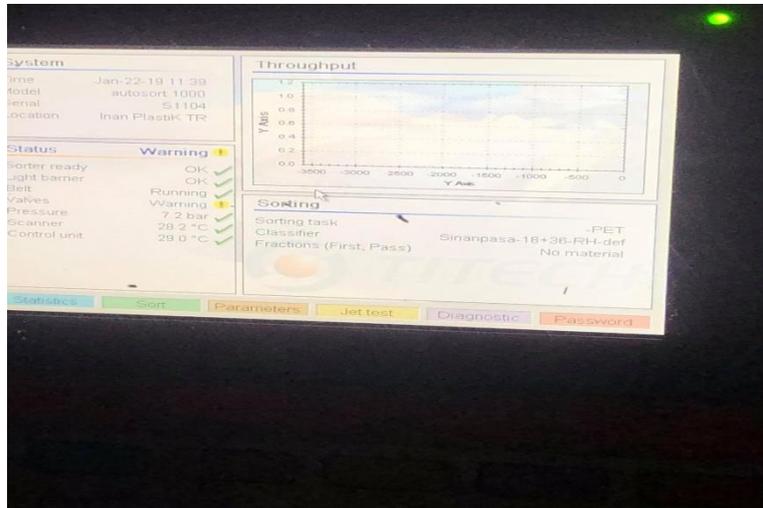


Figure V .8 : Photographie montrant le détecteur de métal

- **Cuve de lavage :**

Le lavage des paillettes s'effectue dans une cuve pleine d'eau chaude (80°C) contenant (NAOH+ détergent). Cette cuve est dotée d'un système d'agitation (vice) qui aide à débarrasser une portion importante des souillures, donc cette étape agit sur le degré de propreté des écailles.



Figure V .9 : Photographies montrant la cuve de lavage

- **Centrifugeuse :**

C'est une machine qui élimine l'eau et la poussière de PET.



Figure V .10 : Photographie montrant Centrifugeuse

- **Séchage :**

Le séchage, couplé à l'étape d'essorage, est le plus souvent pratiqué en flux d'air chaud produit par des résistances électriques. Les particules essorées sont agitées mécaniquement par brassage et exposées à un air chaud dont la température est réglée en fonction de la nature du polymère traité et de la forme géométrique des particules. Le but du tamisage est d'avoir des écailles de même taille (paillettes homogènes).

- **Scanner Sortex :**

C'est une machine qui scanne et élimine le PET coloré, les étiquettes, la poussière et elle produit des paillettes PET transparente haute qualité.



Figure V .11 : Photographie montrant sortex

- **Big bag :**

Le big bag transporte les paillettes de PET.



Figure V .12 : Photographie montrant Big-bag

V .3 Méthode :**V .3.1 Procédure de contrôle :****• L'analyse thermique :**

On prend un échantillon de chaque big bag, au début on a pris les mesures de densité par la calculé comme ceci :

$$D = \left[\frac{(m_1 - m_0)}{10^3} \right] / 0.5$$

(Remarque : m_1 c'est la masse initiale en gramme, m_0 c'est la masse finale de PET).

On met l'échantillon dans une plaque d'aluminium dans un four (étuve) à une température de 220°C pendant 60 min.



Figure V .13 : Photographie montrant étuve

On suite on calcule le taux d'humidité en utilisant deux méthodes d'obtention :

1. A l'aide de la fonction suivante :

$$H = \left[\frac{(m_0 - m_1)}{m_0} \right] * 100$$

2. A l'aide d'un appareil de la marque **Precisa XM50** de mesure d'humidité du PET (on obtient la valeur directement à l'aide d'une courbe d'étalonnage).

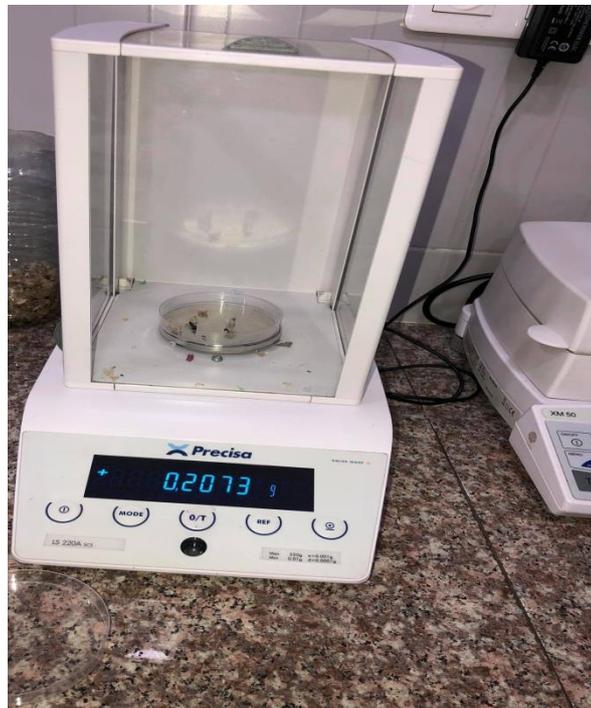


Figure V .14 : Photographie montrant appareil Precisa

En suite on élimine les contaminants et les impuretés comme le pet jaune, pvc...etc.



Figure V .16 : Photographie montrant

Elimination des impuretés



Figure V .17 : Photographie

Montrant pvc jaune

V .4 Méthodologie

4.1 Présentation des produits

- **Le PET recyclé (PETR)**

Le PET choisi pour notre étude a été obtenu auprès de la société. Nous avons conservé ainsi le même lot tout au long de notre étude. Ce PET dit « régénéré » est constitué de paillettes de bouteilles d'eau ou de boisson, qui ont été triées, lavées, séchées et broyées avant conditionnement.



Figure V .17 : Photographie montrant Big bag de pet recyclé

- **Le PET vierge (PETV)**

Ce PET de référence a été choisi pour sa possible utilisation dans l'emballage alimentaire.

- **Film broyé**

Nous avons utilisé les chutes de film alimentaire broyé comme un échantillon pour notre étude.

4.2 Transformation par extrusion

Nous avons fait notre expérience au niveau de l'unité de production du film, nous avons effectué trois essais constitués de pet recyclé /pet vierge/film broyé, comme ceci :

- **Le 1^{er} essai (film broyé 50% /pet recyclé 50)**

Nous avons réceptionné les paillettes de pet recyclé contrôlé par le laboratoire, et nous avons pris les chutes du film alimentaire dans des big bag pour les mettre dans les chargeurs A et B.



Figure v .18 : Photographie montrant les chargeurs (A) et (B)

Nous avons mis dans chaque chargeur :

- Chargeur A : 15% de pet vierge.
- Chargeur B : 85% (50% film broyé / 50% paillette recyclé)



Figure V.19 : Photographie montrant l'écran de contrôle des pourcentages

Par la suite les deux composants se mélangent et fondent à une température élevée de 280°C, dans les deux extrudeuses (extrudeuse A/extrudeuse B) cette augmentation thermique a favorisé la cristallisation du PET en dégradant ces propriétés physico-chimiques en sortant de l'extrudeuse par la fusion.



Figure V.20 : Photographie montrant Extrudeuse

La chaîne passe au cycle de dégazage afin d'arriver au filtre IRINA, ce dernier élimine toutes les impuretés du mélange et laisse pas le PVC passe aux prochaines étapes.



Figure V .21 : Photographie montrant Filtre IRINA

Arrivons à la tête le mélange passe aux cylindres de compression et de refroidissement où la matière fondue se refroidi et se transforme en film solide par la diminution de sa température.



Figure V .22 : Photographie montrant Cylindre de compression et refroidissement

La chaîne passe par des captures de mesure d'épaisseur que nous avons réglé sur l'écran.

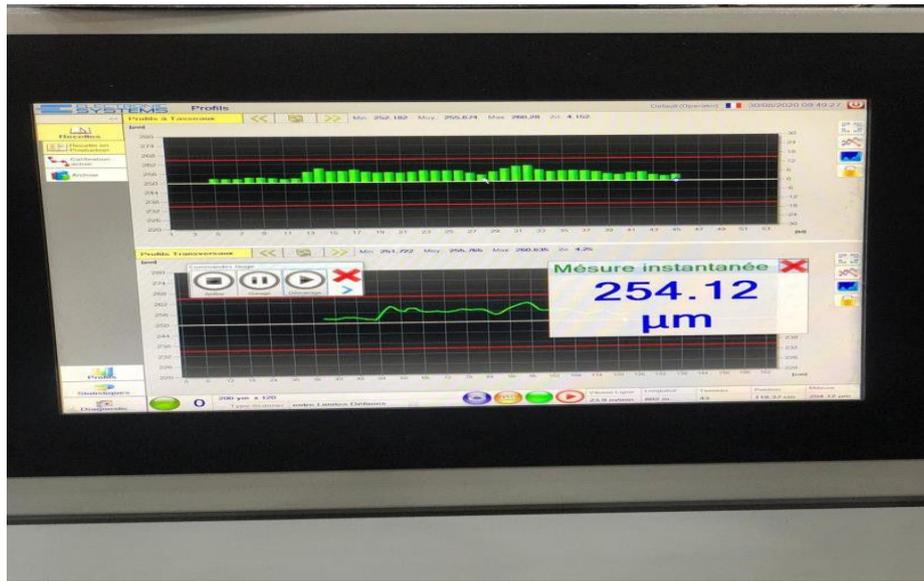


Figure V .23 : Photographie montrant Ecran d’affichage d’épaisseur
Ce dernier passe au justement de la laize qu’elle a une mesure spécifique.



Figure V.24 : Photographie montrant l’ajustement de la laize

- **Le 2ème essai (PET recyclé 70% / film recyclé 30%)**

Nous avons effectué le même travail qu'on a fait au premier essai sauf que nous avons mis au chargeur A le PET vierge avec le pourcentage de 15% et au niveau de chargeur B nous avons mis 85% du PET recyclé qui contient 70% paillette recyclé et 30% film broyé. Nous avons travaillé aux mêmes procédures et même conditions du premier essai.

- **Le 3ème essai (PET recyclé 85%/PET vierge15%)**

Dans cet essai nous avons mis au chargeur A 15% de pet vierge et au chargeur B 85% de pet 100% recyclé que des paillettes et nous avons fait les mêmes démarches que nous avons effectué pendant l'étude de deux derniers essais.

4.3 Condition de travail :

- Température : 280°C
- PET recyclé : 85% (50% film broyé /50% paillettes recyclé)
- PET vierge : 15%
- Epaisseur de film : 250μ
- La laize : 90 cm
- Température des cylindres :
 - $T_1 = 23^\circ\text{c}$
 - $T_2 = 26^\circ\text{c}$
 - $T_3 = 40^\circ\text{c}$
 - $T_4 = 46^\circ\text{c}$
- Durée : 10h00 – 11h40 min

V.5 Schématisation de procédure

Nous prenons l'essai 1 une référence des autres essais :

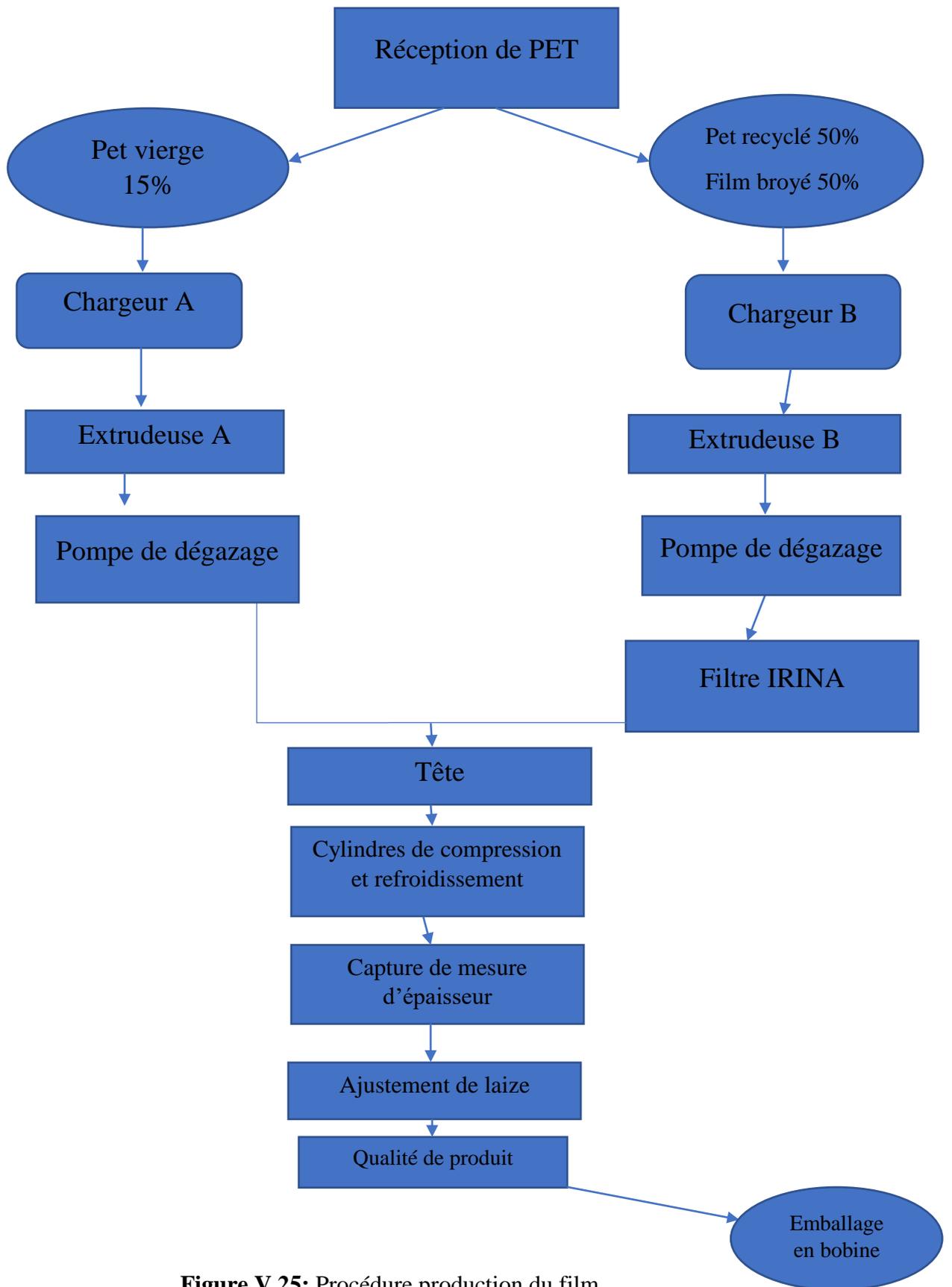
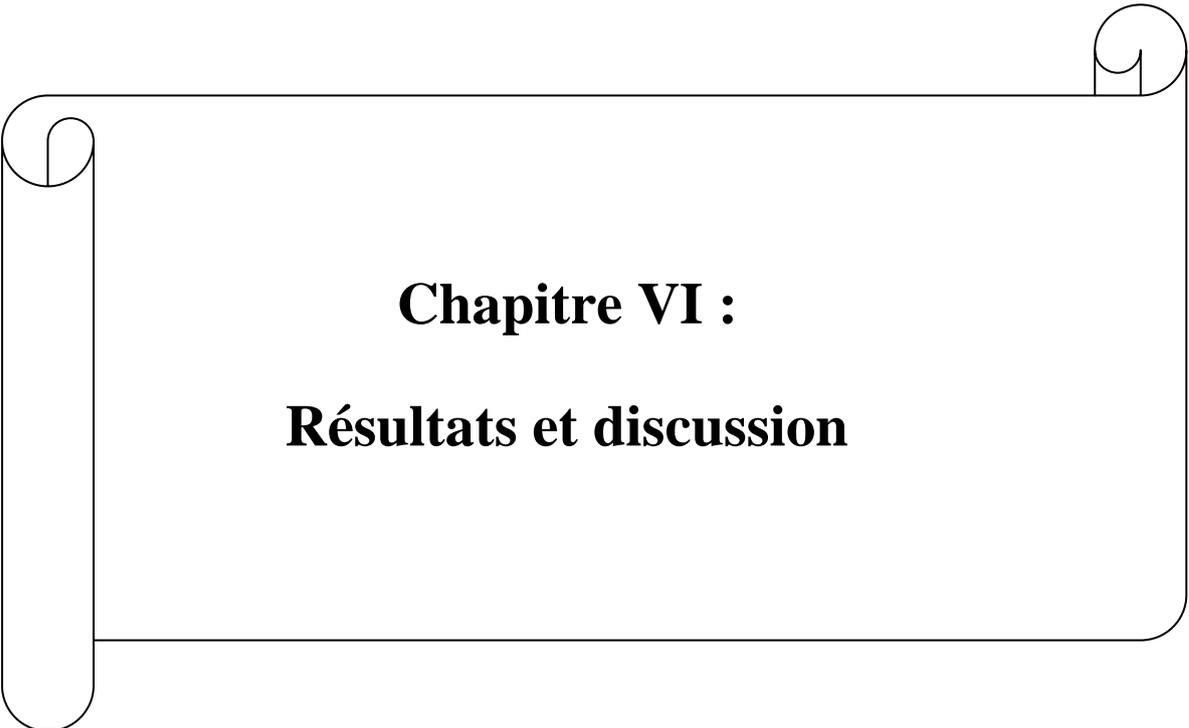


Figure V.25: Procédure production du film



Chapitre VI :
Résultats et discussion

VI.1 Cadre d'étude :

L'objectif de cette étude est de réaliser un certain nombre de caractérisations pour la société **Recycling United** qui produit des emballages plastiques en PET et qui souhaite avoir un certain nombre de précisions sur les points suivants :

- Détermination de l'influence de l'utilisation de PET recyclés de bouteilles sur les produits fabriqués pour être en position de répondre à la future réglementation relative à l'utilisation de PET recyclés en alimentaire ;
- Caractériser le procédé de mise en œuvre actuel qui utilise des pourcentages élevés de PET vierge. Comme nous avons pu le déterminer auparavant, les conditions de mise en œuvre dépendent beaucoup des caractéristiques du matériau, notamment au niveau de l'extrudeuse.

Cette l'étude est jugée importante dans la mesure où elle nous a permis, non seulement de résoudre la problématique de la société liée aux chutes stockées, mais aussi, d'augmenter leurs productions. L'étude consiste donc trois essais avec des pourcentages différents comme suit :

Tableau VI.1 : Pourcentages des 3 échantillons utilisés.

Essais	Film Broyé (recyclé)	PET recyclé
1 ^{er} essai	50%	50% (85 % paillettes recyclées et 15% PET vierge)
2 ^{ème} essai	30%	70% (85 % paillettes recyclées et 15% PET vierge)
3 ^{ème} essai	PET vierge	PET recyclé
	15%	85% (PET 100% recyclé)

1.1 Premier essai où essai de référence

Le PET recyclé est constitué de paillettes de recyclés bouteilles de bonne qualité et de PET vierge.

Le film recyclé est constitué de rebus d'emballage de la société, récupéré au cours de la mise en œuvre et broyés. Ils sont donc considérés comme étant issus d'un PET vierge extrudé une seule fois.

Entre chaque étape de mise en œuvre les films sont broyés de la même façon.

Comme présenté le tableau VI, les emballages réalisés sont des tri-couches constitués d'un film recyclé et de PET recyclé ainsi que PET vierge et de paillettes recyclé.

Pour chaque mise en œuvre, une bobines (environ 500 kilos) de films ont été fabriqués et après chaque mise en œuvre, un prélèvement d'échantillon est effectué sur ces bobines.

1.2 Conditions de mise en œuvre

Le graphe de la Figure VI.1 suivant montre la température durant cette mise en œuvre utilisée dans les 3 essais :

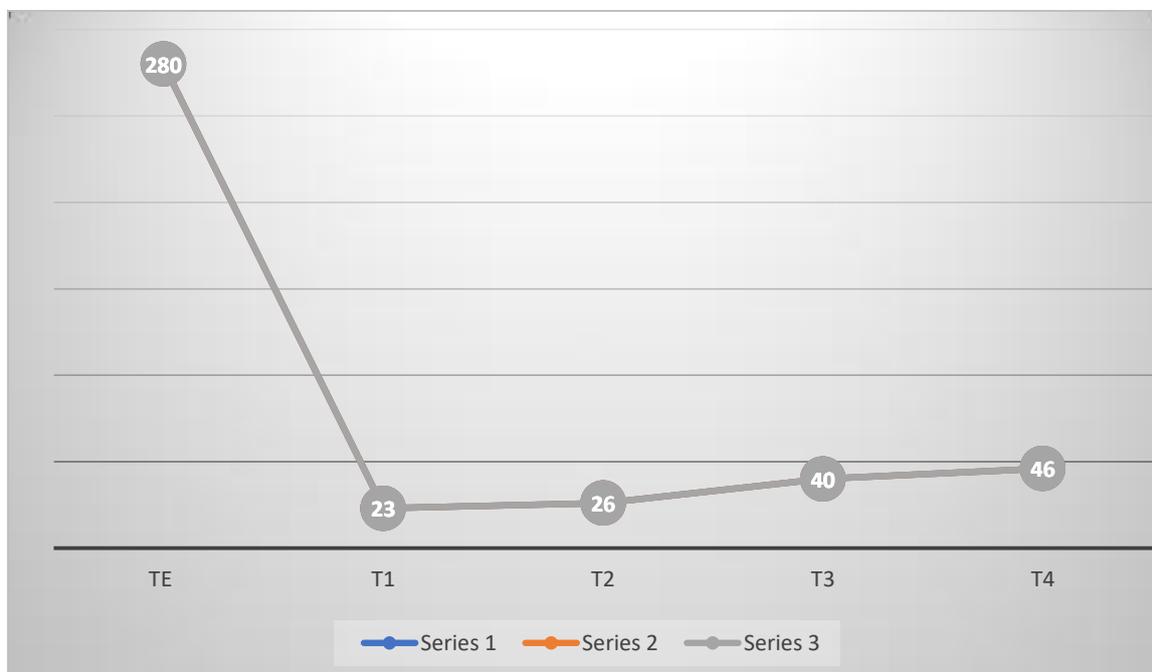


Figure VI 1 : Dégradation du produit en fonction de la température pour les 3 essais effectués.

Te : Température de l'extrudeuse 280°C.

T1 : Température de la première cylindre 23°C

T2 : Température du la deuxième cylindre 26 °C

T3 : Température du la troisième cylindre 40°C

T4 : Température du la quatrième cylindre 46 °C

La température a une influence sur la dégradation des paillettes de pet au niveau de la mise en œuvre de l'extrudeuse par sa température élevée, et disposant d'un système de dégazage sous vide au centre de la vis.

En revanche, la température diminue au niveau des cylindres et nous avons vus que la modalisation de ces caractéristiques physico-chimiques a changé dans cette phase.

- Epaisseur du film : 250μ
- La laize :

La laize de ce processus est mesurée 90cm

- La vitesse mécanisme : 450 kg/h
- La paillette que nous avant contrôlé au niveau de laboratoire et nous avons utilisé dans la mise en œuvre nous avons trouvé ces caractéristiques comme le tableau le montre :

Tableau VI 2 : Fiche de Contrôle

Numéro de big bag	Aspect	H (%)	Densité	Pvc (ppm)	Pet jaune (ppm)	Glu (ppm)	Couleurs (ppm)	Verre	Fer	Autre
351	A	1	0.3	21	2006.8	33.8	/	/	/	/
352										

Moyenne pvc =9.47 ppm

Moyenne densité = 0.30

Moyenne humidité =1%

VI .2 Résultats

➤ Echantillon 1

Les mélanges réalisés avec les pourcentages (film broyé 50% / pet recyclé 50%) ont donné des résultats satisfaisants en termes de propriétés mécaniques, nous avons eu une couleur transparente qui montre que l'essai effectué est réussi, avec obtention d'une bobine de 336.5 kg de très bonne qualité. Aussi, un très bon retour des clients a permis de passer au thermoformage. En ce qui concerne le problème lié à la contamination du PET demeure encore puisqu'il existe aujourd'hui une grande variété de PET recyclés qui se différencient par leurs taux de contaminants. Ainsi donc, il faut choisir un grade peu pollué pour des applications alimentaires.



Figure VI 2 : Photographie montrant la bobine produite de film alimentaire

➤ Echantillon 2

L'essai effectué concerne le mélange de deux composants (pet recyclé 70% et film broyé 30%), un bon résultat a été obtenu par rapport à sa couleur transparente et sa qualité, il faut donc effectuer certaines analyses pour tester sa toxicité et DCS et aussi RAM

A cause de l'épidémie, nous n'avons pas pu les faire pour confirmer ou infirmer sur s'il est alimentaire à 100%.



Figure VI 3 : Photographie montrant la Bobine de film alimentaire issu du 2ème essai

➤ Echantillon 3

Le mélange réalisé avec le PET recyclé de 85% et de PET vierge de 15% se caractérise par, une couleur jaune à cause des paillettes contaminées. En effet, elles contiennent beaucoup d'impuretés et des squelettes qui sont les chutes broyées de film broyé. La bobine produite est de couleur jaune et d'une mauvaise qualité et se casse facilement.



Conclusion

Conclusion générale

Dans un monde en plein bouleversement économique, et dans le cas de notre pays qui favorise plutôt, dans sa politique industrielle, la petite et moyenne entreprise, nous nous sommes penchés sur le mode de recyclage des bouteilles en plastique. Pourquoi? Tout d'abord, parce que le plastique met entre 100 et 1000 ans à se dégrader dans la nature. Cela peut avoir des conséquences sur la faune et la flore, et aussi pour faire des économies. Sachant que plusieurs produits font l'objet d'une importation, l'heure est venue de satisfaire le marché interne en augmentant la capacité de récupération du plastique et le recycler en produits selon les besoins.

L'utilisation du PET bouteille recyclé dans le film alimentaire relève d'un enjeu économique et environnemental important, étant donné l'épuisement global des matières premières issues de l'extraction du pétrole. Les informations bibliographiques que nous avons présentées, indique qu'il existe une différence notable entre la mise en œuvre d'un PET vierge et celle d'un PET recyclé et le film broyé. Ainsi, nous avons choisi de réaliser une étude complète du recyclage de ce matériau afin d'évaluer et de comprendre les mécanismes de dégradation des PET vierge et recyclé au cours de multiples extrusions.

Au terme de cette étude on a conclu que :

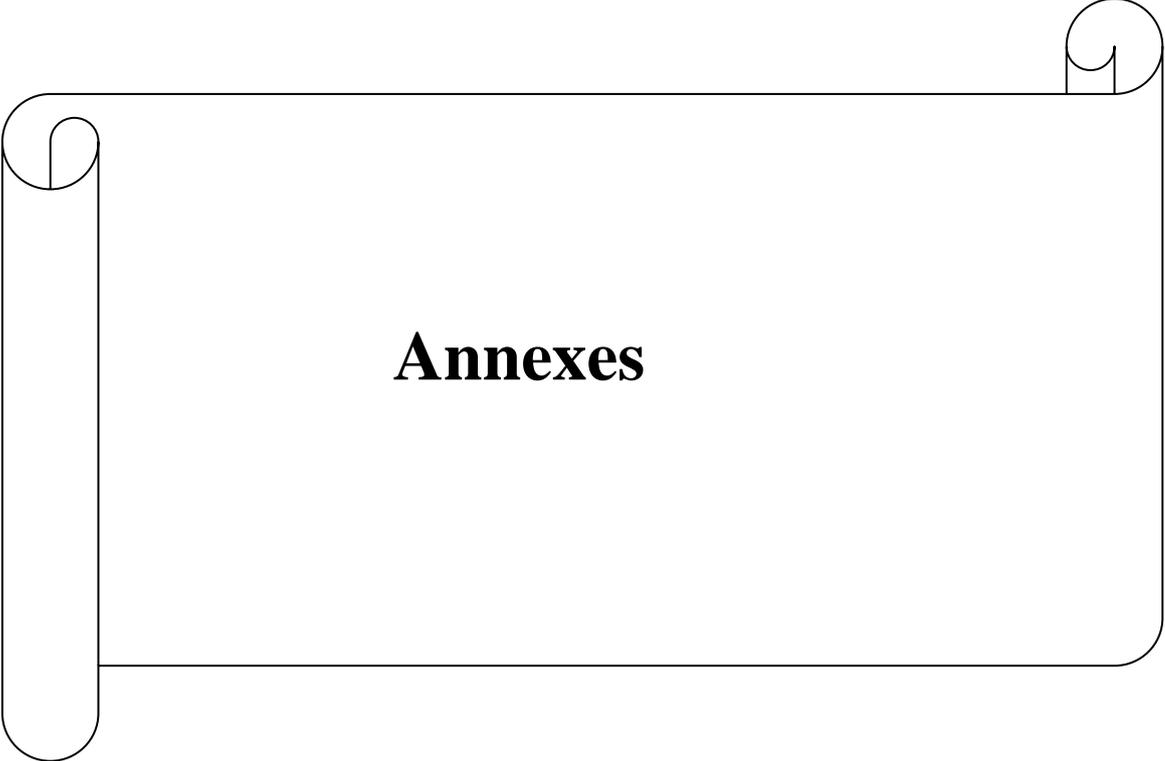
- L'étuvage est une étape très importante dans le recyclage du PET.
- Sous les conditions de changement de température et de transformation, la dégradation devient importante à partir du 2ème recyclage de PET recyclé.
- L'étape de pré lavage avant l'extrudeuse et le séchage après sont deux conditions très important pour éliminer les impuretés et les contaminants pour améliorer la qualité du film alimentaire.
- Les deux essais de (50% PET recyclé/50% film broyé) et de (30% film broyé/70% PET recyclé) étaient réussis à 100% car on a eu une bonne résistivité, la couleur transparente et ne contient pas de PVC.
- L'essai (85% PET recyclé/15% PET vierge) n'était pas valable car on a eu un changement de caractéristique du film (cassant, couleur jaunâtre, contient des impuretés)

Références bibliographiques :

- 1- **A.J. MÜLLER, J.L. FEIJOO, M.E. ALVAREZ, A.C. FEBLES, 1987.** The calorimetric and mechanical properties of virgin and recycled poly(ethylene terephthalate) from beverage bottles , in Polymer Engineering and Science, volume 27, N° 11, , pp. 796-803.
- 2- **A. BALLARA, J. VERDU, 1989.** Physical aspects of the hydrolysis of poly ethylene Terephthalate, in Polymer Degradation and Stability, volume 26, pp. 361-374.
- 3- **A. LAUNAY, F. THOMINETTE, J. VERDU, 1994.** Hydrolysis of poly ethylene terephthalate: a kinetic study, in Polymer Degradation and Stability, volume 46, pp. 319-324.
- 4- **A. LAUNAY, F. THOMINETTE, J. VERDU, 1999.** Hydrolysis of poly ethylene terephthalate. A steric exclusion chromatography study, in Polymer Degradation and Stability, volume 63, pp. 385-389.
- 5- **A. PAWLAK, M. PLUTA, J. MORAWIEC, A. GALESKI, M. PRACELLA, 2000.** Characterization of scrap poly(ethylene terephthalate), in European Polymer Journal, volume 36, pp. 1875-1884.
- 6- **D. PASZUN, T. SPYCHAJ.,1997.** Chemical recycling of poly(ethylene terephthalate), in Industrial & Engineering Chemistry Research, volume 36, , pp. 1373-1383.
- 7- **E. MARECHAL, P.H. GEIL, V.B. GUPTA, Z. BASHIR, 2002.** Handbook of thermoplastic polyesters. Volume 1: Homopolymers and copolymers, Edité par Stoyko FAKIROV, WILEY-VCH, Allemagne, p.753.
- 8- **F. VILLAIN, J. COUDANE, M. VERT, 1995.** Thermal Degradation of Polyethylene Terephthalate: Study of Polymer Stabilization, in Polymer degradation and stability, volume 49, pp. 393-397.
- 9- **F.AWAJA,D.PAVEL,2005.** Recycling of PET, In European polymer journal, volume 41,pp1453-1477.
- 10- **G. MONTAUDO, C. PUGLISI, F. SAMPERI, 1993.** Primary Thermal degradation mechanisms of PET and PBT, in Polymer Degradation and Stability, volume 42, pp 13-28.
- 11- **G.A. SERAD, T.S. THORNBURG., 1995.** Separation of polyethylene terephthalate and polyvinyl chloride using supercritical carbon dioxide, brevet 5432973.
- 12- **G. LI. S.L. YANG, J.M. JIANG et C.X. WU, 2005.** Polymer, 46, 11142-11148.

- 13- **Goodflow, 2005.** Polyéthylène téréphtalate (polyester, PET, PETP) information sur matériaux. Disponible sur : [http://www. goodflow.com](http://www.goodflow.com) 05-12-2005.
- 14- **H. ZIMMERMANN, 1979.**Degradation and Stabilisation of polyesters, Developments in Polymer Degradation – 5, N. Grassie. Applied Science, London, pp. 79-119.
- 15- **H. WIDEN, A. LEUFVEN, T. NIELSEN., 2005.** Identification of chemicals, possibly originating from misuse of refillable PET bottles, responsible for consumer complaints about off-odours in water and soft-drinks, in Food Additives and Contaminants, volume 22, n°7, pp. 681-692.
- 16- **I. C. MC NEILL, M. BOUNEKHEL, 1991.** Thermal Degradation Studies of Terephthalate Polyesters: 1 - Poly (alkylene terephthalate), in Polymer Degradation and Stability, volume 34, pp. 187-204.
- 17- **J-P verdu, 1984.**précis de matière plastique, structures, propriétés mise en œuvre et normalisation 2m Edition.
- 18- **J. VERDU, 1990.**Vieillessement physique des plastiques, Techniques de l'ingénieur, Traité Plastiques et Composites, A3150, p.18.
- 19- **J. SCHEIRS, 1998.** Polymer Recycling : Science, Technology and Application, Ed. John WILEY & SONS (WILEY series in Polymer Science), England, chapitre 4, pp.120-182.
- 20- **J.P. QUENTIN, 2004.** PET ou poly éthylène téréphtalate, Techniques de l'Ingénieur, J6488,
- 21- **M. PACI, F.P. LA MANTIA, 1998.** Competition between degradation and chain extension during processing of reclaimed poly (ethylene terephthalate), in Polymer Degradation and Stability, volume 61, pp. 417-420.
- 22- **M. RULE, 1987.** Polymer Handbook, Volume 2, p120-150.
- 23- **M. PACI, F.P. LA MANTIA., 1999.** Influence of small amounts of polyvinylchloride on the recycling of polyethyleneterephthalate , in Polymer Degradation and Stability, volume 63, pp. 11-14.
- 24- **N.S. ALLEN, M. EDGE, M. MOHAMMADIAN, 1991.** Hydrolytic degradation of poly(ethylene terephthalate): importance of chain scission versus cristallinity, in European Polymer Journal, volume 27, n° 12, pp. 1373-1378.
- 25- **N. MEDJDOUB, 2011.** Effets du triphenylphosphite et du SEBS-g-MA sur les propriétés du système (PET/ PEHD) à base de matériaux recyclé, Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas, Algérie.
- 26- **Nathalie briand,2014.**Fabricationde plastiques auc proprietes varieees. Disponible sur : Septiemecontinent.com , Onglet pedagogique 7em continent. Consulté le 13 septembre 2020.P1.

- 27- P.Y. PENNARUN, 2001.** Migration à partir de bouteilles en PET recyclé - Elaboration et validation d'un modèle applicable aux barrières fonctionnelles, Thèse de Doctorat en chimie, Université de Reims Champagne, U.F.R. Sciences Exactes et Naturelles, Ardenne. Disponible sur: <http://el.archives-ouvertes.fr>
- 28- R.P. DAUBENY, C.W. BUNN, 1954.** The crystal structure of polyethylene terephthalate, in Proceedings of the Royal Society of London, 226A, pp. 531-542.
- 29- R. ASSADI, 2002.** Recyclage du poly (terephthalate d'éthylène), Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (Paris), spécialité Mécanique et Matériaux, 2002, 104.
- 30- R. ASSADI, X. COLIN, J. VERDU, 2004.** Irreversible structural changes during PET recycling by extrusion, in Polymer, volume 45, pp. 4403-4412.
- 31- Roselyne Messal, 2013.** La valorisation des déchets plastiques en Europe et en France: encore des progrès à faire N°371-372. Disponible sur : lactualitéchimique.Org , Actualchim. Consulté le 11 Mars 2013. p12.
- 32- T. RIECKMANN, 1995.** Recycling of PET food grade quality on a commercial scale, in Chemicals Fibers International, volume 45, pp. 182-185.
- 33- U. Koncke, H. G. Zachmann and F. J. Balta-Calleja, 1996.** *Macromolecules*, **29**, 6019
- 34- V. CHAFFRAIX, 2002 .** Etude de l'extrusion du polyéthylène téréphtalate et de ses mélanges non-compatibilisés avec le polyéthylène haute densité - Application au recyclage, Thèse doctorat en Sciences et Génie des Matériaux, Ecole des Mines de Paris.



Annexes

Annexe I

Tableau I.1 : Procédés de transformation du plastique

Procédés	Application	Principe
Calandrage	Permet de fabriquer des produits semi-finis : Les feuilles ou les films résultants seront transformés par la suite pour devenir des pots, des barquettes ou des gobelets.	<ul style="list-style-type: none">•Les films sont mis en bobine ou coupés et empilés pour faire des feuilles, aux dimensions et épaisseurs souhaitées des objets à former.•Elle le passe plusieurs fois entre les rouleaux pour une homogénéisation parfaite, un peu comme une guimauve.•Pour permettre la gélification de la matière, celle-ci passe entre 2 calandres chauffées, réglées selon différents paramètres (température calandres, pressions, vitesse rotation...).
Thermoformage	<ul style="list-style-type: none">•Jouets (bac à sable, toboggans...)•Pots de yaourtBlister•Gobelets et barquettes	<ul style="list-style-type: none">•Mettre en place la feuille et chauffage par un plateau chauffant supérieur et inférieur.•Formage / Refroidissement : une fois le moule en position haute, le vide est fait entre le moule et la feuille.
Injection	<ul style="list-style-type: none">•Médical : Instruments médicaux à usage unique•Automobile : Tableau de bord voiture, pièce sous capot moteur•Loisir : Télévision, téléphone portable...	<ul style="list-style-type: none">•La matière plastique est versée dans la trémie de la presse à injecter.•Elle est chauffée et malaxée par une vis sans fin. Les granulés deviennent liquides et se mélangent.•La pâte est injectée sous pression vers un moule en acier verrouillé.•Le plastique chaud prend la forme du

	<ul style="list-style-type: none"> •Electroménagers : Cafetière, robot... •Emballages : Préformes de bouteilles, seaux, pots 	<p>moule plus froid et se solidifie à mesure que la température baisse.</p>
Soufflage	<p>L'application la plus connue est la bouteille (eau, soda).</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Dans l'atelier de soufflage, on chauffe de nouveau le plastique du tube que l'on va étirer dans un moule à l'aide d'une tige. •Pour que la matière prenne parfaitement la forme du moule, on lui envoie un jet d'air très puissant (le soufflage). •Le moule est ensuite refroidi et s'ouvre, la bouteille apparaît.
Extrusion	<ul style="list-style-type: none"> •Bâtiment : profilés des fenêtres, gouttières, tubes d'évacuation... Médical : tubes perfusion... Emballages : tubes, pailles... 	<ul style="list-style-type: none"> •On verse le polymère sous forme de granulés ou de poudre solide dans la trémie de l'extrudeuse. •La matière est entraînée par la vis sans fin qui tourne dans un cylindre chauffé. •Elle se liquéfie sous l'effet de la chaleur et de la friction. •La vis entraîne le plastique vers la sortie. La tête de sortie (pièce en acier aux formes variées) donne sa forme au produit au plastique qui est ensuite refroidi.
Extrusion gonflage	<p>Fabrication des sacs plastiques, de sacs poubelles, films étirables.</p>	<ul style="list-style-type: none"> •On insuffle de l'air comprimé dans le plastique ramolli. •Il se gonfle alors et s'élève verticalement comme une bulle de

		<p>film très fin. On le laisse ensuite refroidir.</p> <ul style="list-style-type: none"> •Avant de l'aplatir entre des rouleaux, on forme des soufflets et on prédécoupe les sacs. •On les enroule sur des bobines ou on forme des rouleaux.
Extrusion de soufflage	<ul style="list-style-type: none"> •Flacons, bouteilles, bidons, •Pièces pour l'automobile 	<ul style="list-style-type: none"> •Le tube extrudé (appelé paraison) est enfermé dans un moule de soufflage (2 demi-coquilles ayant la forme désirée). •La paraison présente un orifice à son extrémité, qui est pincée (là où sera l'ouverture finale du récipient). •Puis de l'air est injecté dans le moule afin que le tube adopte parfaitement les parois où il est très rapidement refroidi. Il suffit alors de démouler l'objet ainsi fabriqué et le tour est joué.
Expansion moulage	<ul style="list-style-type: none"> •Caisses à poissons, barquettes 	<ul style="list-style-type: none"> •Avant d'être expansé, le polystyrène se présente sous forme de petites billes qui renferment des micro-inclusions de gaz (à l'état liquide). •Au contact de la vapeur d'eau, la matière plastique se ramollit et le gaz qu'elle contient se dilate. •Les billes gonflent grâce à l'air qu'il contient, comme le pop-corn, mais avec une forme plus régulière •Cette première expansion est réalisée

		<p>en usine dans de grandes cuves en inox et permet d'obtenir jusqu'à 30 fois le volume initial des petites billes de polystyrène.</p> <p>•Ensuite, on sèche les billes pré-expansées dans un silo et on les introduit dans un moule fermé, soumis à une nouvelle injection de vapeur d'eau. Les billes reprennent leur expansion, occupent tout l'espace du moule et se soudent entre elles pour obtenir la forme désirée de l'emballage.</p>
--	--	--

Annexe II

Morphologie et structure cristalline

La cristallisation d'un polymère semi-cristallin est obtenue par le refroidissement du matériau à partir de l'état fondu jusqu'à son état vitreux ou bien par recuit à une température légèrement supérieure à sa température de transition vitreuse (T_g). Le processus d'arrangement moléculaire se décrit en trois phases distinctes. Tout d'abord la nucléation puis la croissance de germes, et enfin une étape de cristallisation secondaire. Dans le cas du PET, les cristaux issus de la cristallisation secondaire se localisent dans la zone séparant deux lamelles issues de la cristallisation primaire (R.P. DAUBENY et al., 1954). L'orientation et la taille de ces zones cristallines dépendent énormément des conditions dans lesquelles les cristaux se forment.

Annexe III



Figure 1 : Photographie montrant l'ajustement de l'épaisseur



Figure 2 : Photographie montrant l'observation de la température des cylindres



Figure 3 : Photographie montrant les bobines du film alimentaire produite