

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE



SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences appliquées

Département de Génie des Procédés

Mémoire fin d'études

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie.

Filière : Industries Pétrochimiques.

Spécialité : Génie du Pétrochimique.

Présenté Par :

DJERIOU Houssam

BENAOUN Badreddine

Thème :

**Etude de la recyclabilité du Polypropylène : impacts  
économiques et Environnementales**

Soutenu publiquement le : 12/06/2023

Devant le jury composé de :

Dr. RAHMANI Abdellatif

MCB (UKM Ouargla)

Président

Dr. ZOBEDI Naoual

MCB (UKM Ouargla)

Examinatrice

Dr. ROUANE Azeddine

MCB (UKM Ouargla)

Encadreur

Année Universitaire :2022/2023

## *Dédicace*



*Nous tenons à dédier cet humble travail à:*

*À nos parents, qu'Allah les préserve et les protège,*

*À nos frères et sœurs,*

*À nos meilleurs amis,*

*À tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, en particulier nos enseignants.*

## **Remerciements**

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout Puissant de nous avoir donné la santé, la volonté et la patience pour réaliser ce travail.*

*Nous tenons à remercier toutes les personnes sans lesquelles ces années d'études n'auraient été que le pâle reflet de celles que nous avons passées.*

*Nos profonds remerciements vont particulièrement à notre Directeur de ce mémoire de master Dr. ROUANE Azeddine, Maître de conférences au Département de Génie des Procédés à la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université Kasdi Merbah-Ouargla, qui nous a guidés depuis la fin de l'étude, a eu la gentillesse de nous encadrer, et nous a encouragés tout au long de notre travail.*

*Nous tenons à remercier aussi les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail. Dr. RAHMANI Abdellatif, Maître de conférences au Département de Génie des Procédés à la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université Kasdi Merbah-Ouargla, qui nous fait l'honneur de présider ce jury .*

*Dr. ZOBEBIDI Naoual, Maître de conférences au Département de Génie des Procédés à la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université Kasdi Merbah-Ouargla d'avoir accepté d'examiner ce travail .*

*Nos remerciements à tous nos enseignants et enseignantes durant les cinq ans d'étude universitaire. Enfin, on adresse nos sincères sentiments de gratitude et de reconnaissance à nos familles, nos amis et toute personne qui a, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce travail .*

## Résumé

Ce travail vise à étudier le recyclage du polypropylène et ses impacts économiques et environnementaux. Ainsi, plusieurs études et statistiques ont été réalisées sur le sujet, et nous pouvons en conclure que le processus de recyclage est essentiel pour réduire la pollution environnementale et améliorer l'économie durable, tout en contribuant à la création de nouveaux emplois. Des technologies avancées sont utilisées pour convertir les produits en polypropylène usagés en matières premières réutilisables. Au lieu de se débarrasser des produits en polypropylène de manière non durable, ils sont collectés et traités en vue de leur réutilisation dans la fabrication de nouveaux produits. Le recyclage du polypropylène contribue également à réduire la quantité de déchets plastiques qui se retrouvent dans les décharges et qui sont brûlés ou se décomposent lentement dans l'environnement.

**Mots clés : Polypropylène, recyclage, impacts économiques, économie durable, pollution.**

## ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة إعادة تدوير مادة البولي بروبيلين وتأثيراتها الاقتصادية والبيئية. وبالتالي، تم إجراء العديد من الدراسات والإحصاءات حول هذا الموضوع، ويمكننا أن نستنتج أن عملية إعادة التدوير ضرورية للحد من التلوث البيئي وتحسين الاقتصاد المستدام، مع المساهمة في خلق وظائف جديدة. تستخدم التقنيات المتقدمة لتحويل منتجات البولي بروبيلين المستخدمة إلى مواد خام قابلة لإعادة الاستخدام. بدلاً من التخلص من منتجات البولي بروبيلين بطريقة غير مستدامة، يتم جمعها ومعالجتها بهدف إعادة استخدامها في تصنيع منتجات جديدة. تساعد إعادة تدوير مادة البولي بروبيلين أيضاً على تقليل كمية النفايات البلاستيكية التي تنتهي في مدافن النفايات والتي يتم حرقها أو تحللها ببطء في البيئة.

**الكلمات المفتاحية: بولي بروبيلين، إعادة التدوير، تأثيرات اقتصادية، اقتصاد مستدام، تلوث.**

## Abstract

This work aims to study the recycling of polypropylene and its economic and environmental impacts. Therefore, a series of studies and statistics have been conducted on the subject, from which we can conclude that the recycling process is crucial for reducing environmental pollution and improving sustainable economies. It also contributes to creating new job opportunities. Advanced technology is employed to convert used polypropylene products into reusable raw materials. Instead of disposing of polypropylene products in an unsustainable manner, they are collected and processed for reuse in the production of new items. Recycling polypropylene helps to reduce the amount of plastic waste that ends up in landfills and slowly burns or decomposes in the environment.

**Key words: Polypropylene, recycling, economic impacts, sustainable economy, pollution.**

## Liste des Tableaux

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Chapiter I: Polypropylène</b>		
<b>Tableau I.1</b>	Propriétés thermiques du polypropylène	12
<b>Tableau I.2</b>	Propriétés mécaniques du polypropylène	13
<b>Tableau I.3</b>	Propriétés électriques du polypropylène	14
<b>Tableau I.4</b>	Propriétés optiques du polypropylène	15
<b>Tableau I.5</b>	Propriétés de surface du polypropylène	16
<b>Tableau I.6</b>	Additif du polypropylène	18
<b>Tableau I.7</b>	Performances en service du polypropylène	19
<b>Chapitre II : Recyclage du Polypropylène</b>		
<b>Tableau II.1</b>	Le PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) des polymères les plus courants et d'autres matériaux.	31
<b>Tableau II.2</b>	application Polypropylène après recyclage	32

## Liste des Figures

N°	Titre	Page
<b>Chapiter I: Polypropylène</b>		
<b>Figure I.1</b>	Formule développée	4
<b>Figure I.2</b>	Polypropylène isotactique	8
<b>Figure I.3</b>	Polypropylène syndiotactique	8
<b>Figure I.4</b>	Polypropylène atactique	9
<b>Figure I.5</b>	Aléatoire copolymère	10
<b>Figure I.6</b>	Copolymère en Bloque	10
<b>Figure I.7</b>	Processus d'extrusion de mon filament	20
<b>Figure I.8</b>	Processus de moulage par injection	22
<b>Figure I.9</b>	Processus de Moulage par Soufflage	22
<b>Figure I.10</b>	Consommation mondiale de polypropylène par utilisation finale	23
<b>Chapitre II : Recyclage du Polypropylène</b>		
<b>Figure II.1</b>	Évolution de la production mondiale du plastique	27
<b>Figure II.2</b>	Polyéthylène Téréphtalate (PET)	33
<b>Figure II.3</b>	Polyéthylène haute densité ou High Densité Polyéthylène (PEHD)	34
<b>Figure II.4</b>	Le polychlorure de vinyle (PVC)	34
<b>Figure II.5</b>	Polyéthylène basse densité ou Low Densité Polyéthylène (LDPE)	35
<b>Figure II.6</b>	Polypropylène (PP)	35
<b>Figure II.7</b>	Polystyrène (PS)	35
<b>Figure II.8</b>	Autres plastiques, les polyamides (PA) et les polycarbonates (PC)	35
<b>Chapitre III : Impacts économiques et environnementales</b>		
<b>Figure III.1</b>	Production mondiale et génération de déchets de différents types de plastiques	41
<b>Figure III.2</b>	Offre et demande mondiales de polypropylène (millions de tonnes métriques)	46
<b>Figure III.3</b>	Augmentation de la capacité de production de propylène (millions de tonnes métriques)	47
<b>Figure III.4</b>	Polymères par produit 2014	47
<b>Figure III.5</b>	Taux de croissance annuel moyen de la demande de polypropylène	48
<b>Figure III.6</b>	Pourcentage de particules de plastique dans l'eau en bouteille	49
<b>Figure III.7</b>	Le plastique émet des gaz significatifs à chaque étape du cycle de vie	50

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

PP : Polypropylène.

PVC : Polychlorure de vinyle.

PS : Polystyrène.

PET : Polyéthylène téréphtalique.

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur.

BPC : Les Biphényles Polychlorés.

SAO : Substances Appauvrissant La couche d'ozone.

HFC : Hydrofluorocarbures.

# Sommaire

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Résumé.....	III
Liste des Tableaux.....	IV
Liste des Figures.....	V
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	VI
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapiter I: Polypropylène</b>	
1. Introduction.....	3
2. Présentation du polypropylène .....	4
2.1. La polymérisation .....	4
2.2. Préparation industrielle du polypropylène .....	5
2.3. Développements récents dans les technologies de fabrication du polypropylène.....	5
3. Origine du Polypropylène (synthèse et application).....	6
4. La stéréochimie du polypropylène .....	6
4.1. Polypropylène isotactique.....	6
4.2. Polypropylène syndiotactique.....	7
4.3. Polypropylène atactique .....	7
5. Types de polypropylène.....	8
5.1. Homopolymère.....	8
5.2. Copolymère .....	8
6. Caractéristiques du PP.....	10
6.1. Density.....	10
6.2. Propriétés thermiques.....	10
6.3. Propriétés mécaniques .....	11
6.4. Propriétés électriques .....	12
6.5. Propriétés optiques .....	14
6.6. Propriétés de surface .....	15
6.7. Propriétés acoustiques .....	16
6.8. Comportement biologique .....	16
6.9. Additifs.....	17



6.10. Performances en service .....	17
7. Influence du Polypropylène sur la santé d'être humain /environnement .....	18
8. Applications de Polypropylène.....	19
a. Fibres et Tissus .....	19
b. Cerclage .....	20
c. Film .....	20
d. Feuille\ thermoformage .....	20
e. Moulage par Injection .....	20
f. Moulage par Soufflage.....	21
g. Automobile.....	22
9. Conclusion.....	22
10. Références.....	23

## CHAPITRE II: Recyclage du Polypropylène

1. Introduction.....	25
2. Quelques données statistiques .....	25
3. Definition du Recyclage.....	26
4. Le recyclage des matières plastiques.....	26
5. Sources des déchets plastiques .....	26
6. Les méthodes de recyclage .....	27
6.1. Réutilisation du Polypropylène .....	27
6.2. Recyclage primaire (recyclage mécanique) .....	27
6.3. Recyclage secondaire .....	27
6.4. Recyclage tertiaire .....	28
6.5. Recyclage quaternaire .....	28
7. Application de matières plastiques avant et après recyclage mécanique ( P P )	30
8. Recyclage sous forme de mélanges de déchets de polymères .....	30
9. Elimination des déchets .....	30
10. Logo en matière recyclée .....	31
10.1. Le système de 7 codes.....	31
11. Recyclage du polypropylène .....	34
12. Les avantages et les inconvénients du recyclage .....	34
12.1. Les avantages .....	34
12.2. Les inconvénients .....	34
13. Conclusion.....	35
14. References.....	36

---

**CHAPITRE III : Impacts économiques et environnementales**

<b>1. Introduction.....</b>	<b>38</b>
<b>2. L'impact économique du processus de recyclage du polypropylène.....</b>	<b>38</b>
<b>2.1. Économiser les ressources naturelles .....</b>	<b>38</b>
<b>2.2. Réduire le coût de production .....</b>	<b>39</b>
<b>2.3. Création d'emplois.....</b>	<b>40</b>
<b>2.4. Promouvoir la durabilité .....</b>	<b>40</b>
<b>2.5. Stimuler l'innovation, la recherche et le développement .....</b>	<b>41</b>
<b>2.6. Offre des opportunités d'emploi et stimule l'économie locale.....</b>	<b>42</b>
<b>2.7. L'économie circulaire .....</b>	<b>43</b>
<b>2.8. Offre et demande mondiales.....</b>	<b>43</b>
<b>2.9. Le prix du polypropylène .....</b>	<b>45</b>
<b>3. L'impact environnemental du processus de recyclage du polypropylène.....</b>	<b>45</b>
<b>3.1. Effets de la pollution plastique sur le polypropylène recycle.....</b>	<b>45</b>
<b>5. Références.....</b>	<b>51</b>
<b>Conclusion général .....</b>	<b>54</b>

---

# Introduction Générale

---

## Introduction générale

Le recyclage du polypropylène, aussi appelé PP, est une étape cruciale dans la gestion des déchets plastiques et la promotion du développement durable .

Le polypropylène est l'un des polymères les plus largement utilisés dans l'industrie des plastiques en raison de ses excellentes propriétés mécaniques, de sa légèreté et de sa polyvalence. Cependant, la production et l'augmentation de la consommation de polypropylène ont causé d'importants problèmes environnementaux, notamment en raison de la mauvaise gestion des déchets plastiques .

L'étude sur le recyclage du polypropylène porte sur les processus et les techniques de collecte, de tri, de nettoyage et de récupération des matériaux en polypropylène usagés dans le but de les réutiliser dans de nouveaux produits. Cette approche vise à réduire la dépendance à l'égard des ressources vierges, à réduire l'accumulation de déchets plastiques dans les décharges et à réduire les impacts environnementaux associés à la production de plastique vierge.

Le premier chapitre de cette thèse se concentrera sur une analyse détaillée des propriétés, des utilisations, de la production et des propriétés du polypropylène qui affectent sa recyclabilité. Une bonne compréhension de ce matériau est essentielle pour évaluer son potentiel de recyclabilité et identifier les enjeux techniques et économiques liés à cette démarche.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude du recyclage du polypropylène. Il examinera les différentes méthodes et technologies de recyclage disponibles, en mettant l'accent sur la collecte, le tri et le traitement des déchets plastiques. Cette analyse évaluera l'efficacité et la faisabilité des différentes approches de recyclage, en soulignant les avantages et les limites de chaque méthode.

Le troisième chapitre se penchera sur les impacts économiques du recyclage du polypropylène. Il examinera les implications financières pour les entreprises et les industries impliquées dans le recyclage, en analysant les coûts de collecte, de tri, de traitement et de fabrication de produits à partir de polypropylène recyclé. Cette évaluation économique comprendra également une analyse des avantages potentiels tels que la réduction des coûts des matières premières, la création d'emplois dans l'industrie du recyclage et les économies d'énergie.

De plus, ce travail étudiera les impacts environnementaux du recyclage du polypropylène. Il explorera les avantages environnementaux tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la conservation des ressources naturelles et la réduction de la pollution

des sols et de l'eau. Des méthodes d'évaluation environnementale seront utilisées pour quantifier ces impacts et comparer les résultats du recyclage du PP avec ceux résultant de l'utilisation de PP vierge.

En conclusion, l'étude sur le recyclage du polypropylène met en évidence les impacts économiques et environnementaux positifs de cette pratique. Le recyclage du polypropylène réduit la dépendance à l'égard des ressources vierges, crée des emplois, réduit les émissions de gaz à effet de serre et réduit la pollution plastique. L'objectif ultime est de contribuer à la transition vers une économie circulaire, cependant, il est important de relever les défis techniques et logistiques associés à la collecte et au traitement des déchets plastiques pour maximiser les avantages du recyclage du polypropylène.

---

# Chapter I: Polypropylène

---

## 1. Introduction

Le polypropylène (PP) a d'abord été produit par Giulio Natta, à la suite des travaux de Karl Ziegler, par polymérisation des monomères de propylène en 1954 [1]. La seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, a connu une croissance significative de la production et de l'utilisation de polypropylène dans le monde entier. Du début des années 1960 jusqu'à la crise pétrolière au début des années 1970, le taux de croissance était d'environ 25% par an [2].

La macromolécule de polypropylène contient de 10000 à 20000 unités monomères. La disposition spatiale des groupes méthyle attachés à chaque deuxième atome de carbone de la chaîne peut différer. Le polypropylène, qui est un thermoplastique semi-cristallin, est réalisé sous la forme d'un polymère homogène par polymérisation du monomère de propylène à l'aide de catalyseurs Ziegler-Natta stéréospécifiques [3].

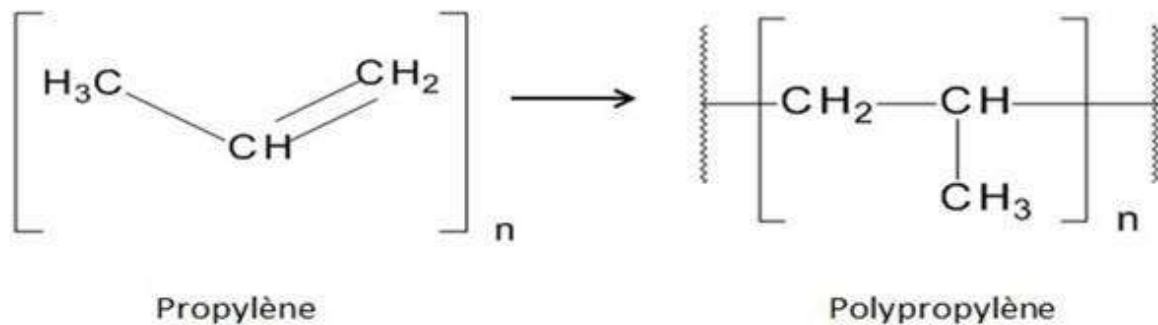


Figure I.1: Formule développée [3]

## 2. Présentation du polypropylène

Le polypropylène est une matière thermoplastique semi-cristalline. Il est fabriqué par polymérisation de monomères de propylène en une molécule ou de très longues chaînes polymères. Il existe un certain nombre de façons différentes de relier les monomères les uns aux autres, comme avec la plupart des matériaux thermoplastiques.

Le polypropylène est un thermoplastique couramment utilisé dans de nombreux produits de consommation et industries. Il appartient à la famille des polyoléfines, qui comprend également le polyéthylène.

Le Polypropylène est connu pour ses propriétés mécaniques élevées, notamment sa résistance à la traction, à la flexion et à la fatigue. Il est également résistant aux chocs et à la déformation, et possède une faible densité, ce qui le rend léger [1].

### 2.1. La polymérisation

Le processus de polymérisation, ou polymération, est la première étape de la fabrication du polypropylène. Ce processus se produit par réaction du propylène gazeux pour former de longues chaînes d'unités répétitives connues sous le nom de monomères. Voici les étapes du processus de polymérisation pour obtenir du polypropylène:

#### 2.1.1. Préparation du catalyseur

Des catalyseurs spéciaux sont utilisés pour activer la réaction de polymérisation. Il existe plusieurs types de catalyseurs pouvant être utilisés, tels que des catalyseurs acides ou des catalyseurs basiques. Les catalyseurs utilisés varient en fonction du type de polymère souhaité et de la technologie utilisée dans le processus.

#### 2.1.2. Réaction de polymérisation

Le propylène est exposé à une pression et à une température élevée en présence du catalyseur approprié. La réaction de polymérisation conduit à la formation de longues chaînes de polymère, où les unités répétitives de propylène (monomères) sont liées ensemble pour former le polypropylène.

#### 2.1.3. Refroidissement et solidification

Après la complétion de la réaction de polymérisation, le polymère formé est refroidi et solidifié pour obtenir une forme solide. Différentes méthodes de refroidissement peuvent être utilisées, telles que le flux d'eau froide ou l'air refroidi.



#### **2.1.4. Découpe et séchage**

Le polymère solide est broyé en petites pièces à l'aide de machines de découpe spéciales. Ensuite, ces morceaux sont séchés pour éliminer toute humidité résiduelle. [1].

Après la complétion du processus de polymérisation et de la préparation initiale, le polypropylène obtenu peut être utilisé dans différentes opérations de formage de plastique.

### **2.2. Préparation industrielle du polypropylène**

Le polypropylène est préparé industriellement par un procédé appelé polymérisation, généralement en présence de catalyseurs métalliques. Le processus comprend les étapes suivantes :

#### **2.2.1. Préparation du monomère**

Le monomère (propylène) est préparé à partir de pétrole brut ou de gaz naturel par des processus de craquage, de distillation et de craquage catalytique.

#### **2.2.2. Polymérisation**

Le monomère est introduit dans un réacteur de polymérisation contenant des catalyseurs métalliques tels que l'oxyde d'arsenic. La polymérisation est réalisée en chauffant le monomère à une température élevée et à une pression élevée pendant quelques heures, ce qui permet à de nombreuses molécules de monomère de se lier pour former les longues chaînes de polypropylène.

#### **2.2.3. Préparation finale**

Le mélange résultant de la polymérisation est refroidi, puis transformé en granulés, en fibres, en films ou dans toute autre forme en fonction de l'utilisation prévue.

Il convient de noter qu'il existe différentes techniques pour préparer le polypropylène industriellement, notamment la technologie de conversion du pétrole qui produit du polypropylène de haute qualité et des performances exceptionnelles [4].

### **2.3. Développements récents dans les technologies de fabrication du polypropylène**

Les techniques de fabrication du polypropylène ont connu de grandes avancées au cours des dernières décennies, en particulier ces dernières années. Ces avancées visent à améliorer l'efficacité de la production, à réduire les coûts et à développer les produits de manière générale. Les dernières évolutions des techniques de fabrication du polypropylène comprennent :

L'amélioration des processus chimiques utilisés pour produire le polypropylène, ce qui permet d'augmenter la productivité et d'améliorer la qualité du produit final.

L'amélioration des techniques thermiques utilisées pour façonner le polypropylène, ce qui permet de produire des produits complexes, plus précis et plus durables.

Le développement de nouvelles technologies de purification et de recyclage du polypropylène utilisé, ce qui réduit les coûts de production et préserve l'environnement [5].

### **3. Origine du Polypropylène (synthèse et application)**

Le polypropylène (PP) est un polymère thermoplastique qui a été synthétisé pour la première fois en 1951 par des chercheurs italiens, Giulio Natta et Karl Ziegler, qui ont découvert une méthode de production de polymères à haute densité et haute pureté en utilisant des catalyseurs de type Ziegler-Natta. Cette méthode a été brevetée en 1954 [1].

La matière première pour la fabrication du polypropylène est le propylène ou le polymère dérivé du propylène. Le propylène est obtenu à partir des raffineries de pétrole brut ou des usines de craquage du gaz naturel. Le propylène est ensuite converti en polypropylène par polymérisation, ce qui produit de longues chaînes de polypropylène. Le polypropylène est utilisé dans diverses applications, notamment la fabrication de fibres, de films, de tuyaux.

### **4. La stéréochimie du polypropylène**

L'étude de la stéréochimie du polypropylène se concentre sur l'analyse des configurations spatiales des molécules de polypropylène, et sur leur influence sur les caractéristiques de la matière. Le polypropylène est un polymère qui possède une grande diversité de propriétés et d'applications, grâce à la variabilité de ses configurations stéréochimiques. La production du polypropylène nécessite la réaction du monomère de propylène avec un catalyseur, tandis que divers facteurs tels que la température, la pression et la qualité chimique du catalyseur, affectent la stéréochimie de cette matière [3].

#### **4.1. Polypropylène isotactique**

Le polypropylène isotactique est un type de polymère qui se distingue par l'alignement séquentiel des atomes centraux (carbone) sur un seul côté de la chaîne principale de la molécule, formant ainsi une structure tridimensionnelle homogène et régulière. Le polypropylène isotactique se caractérise par des propriétés distinctes telles que la résistance à la corrosion, aux rayons UV et à la chaleur, et est largement utilisé dans l'industrie des fibres, des films plastiques, de l'emballage et de l'encapsulation. Le polypropylène isotactique est produit par la réaction du

monomère de propylène en présence de catalyseurs adaptés tels que les catalyseurs actifs avec des substances organiques complexes [3].

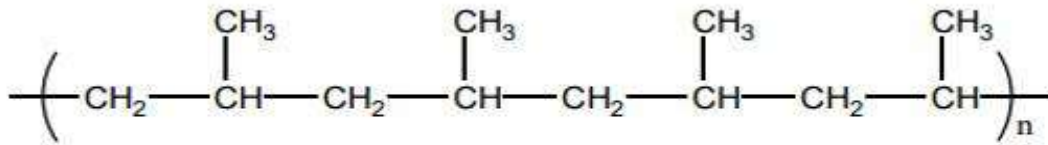


Figure I.2: Polypropylène isotactique [3]

#### 4.2. Polypropylène syndiotactique

Le polypropylène syndiotactique est un type de polymère dont les atomes centraux (carbone) sont disposés de manière alternative sur les deux côtés de la chaîne moléculaire, ce qui conduit à une structure tridimensionnelle ordonnée mais non homogène. Le polypropylène syndiotactique présente des propriétés uniques telles que la résistance aux chocs et à la chaleur, et est largement utilisé dans la production de films, de fibres et d'emballages plastiques. Il est produit par la réaction du monomère de propylène en présence de catalyseurs spécifiques tels que les catalyseurs métallo cènes [3].

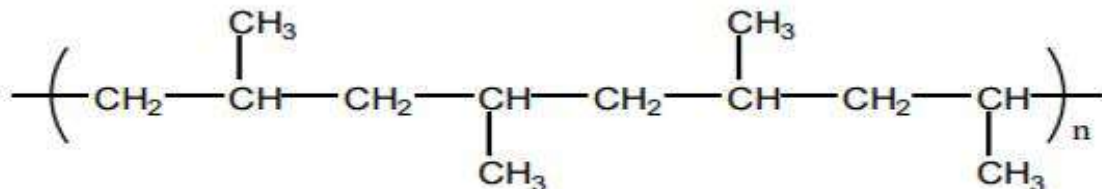


Figure I.3: Polypropylène syndiotactique [3]

#### 4.3. Polypropylène atactique

Le polypropylène atactique est un type de polymère dans lequel les atomes de carbone centraux ne sont pas disposés de manière séquentielle le long de la chaîne principale de la molécule, ce qui donne lieu à une structure tridimensionnelle irrégulière et désordonnée. Ses propriétés physiques et chimiques diffèrent de celles des polypropylènes isotactique et syndiotactique, avec une faible cristallinité, une faible résistance mécanique et une température de fusion basse. Ce polymère est souvent utilisé comme additif pour améliorer la fluidité et la résistance aux chocs d'autres polymères, ainsi que dans la production de films plastiques et d'emballages. Sa production implique la polymérisation du monomère de propylène en présence de catalyseurs spécifiques tels que des complexes métalliques ou des catalyseurs Ziegler-Natta [3].

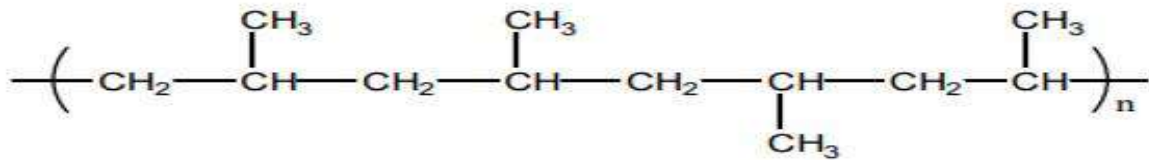


Figure I.4: Polypropylène atactique [3]

## 5. Types de polypropylène

Il existe plusieurs types de polypropylène (PP), chacun ayant des propriétés spécifiques qui les rendent adaptés à différentes applications. Les principaux types de PP sont :

### 5.1. Homopolymère

L'homopolymère PP est fabriqué par polymérisation du propylène en présence d'un catalyseur stéréospécifique. Les homopolymères sont plus rigides et résistent mieux aux températures élevées que les copolymères, mais leur résistance aux chocs à des températures inférieures à zéro est limitée [6].

L'homopolymère PP est commercialisé en formulation, fibre, film, papier, réservoirs de lave-glace, Séchoirs, stérilisateur, fers à repasser, cafetières, grille-pain, etc. Support de tapis avec fibres et fils, Tissus d'ameublement, vêtements, Tissu médical, tissus d'intérieur automobile [3].

### 5.2. Copolymère

Les propriétés du PP dépendent du type et de la quantité de comonomère. Il existe deux types de base : les copolymères statistiques et les copolymères hétérophasiques ou séquencés. Les polymères statistiques contiennent 1,5% à 6% en poids d'éthylène ou d'alcènes supérieurs (tels que le butène 1) en distribution aléatoire et en une seule phase chimique. La différence essentielle entre un copolymère statistique et un copolymère séquencé est que le copolymère séquencé contient du comonomère sous la forme d'une phase caoutchouteuse dispersée. La structure du PP copolymérisé statistique et séquencé est schématisée [2].

Le PP copolymérisé donne une sensation plus douce aux films et aux produits fibreux par rapport aux homopolymères. Cependant, les copolymères PP sont plus chers que les homopolymères. Les applications typiques du PP copolymérisé sont les boîtiers de batterie, les supports de remplissage de pare-chocs, les garnitures intérieures, les boîtes à gants, les plateaux d'emballage et les moulures de fenêtre, les boîtiers de cassettes vidéo, les chaises de bureau, les contenants jetables, les boîtes et les boîtiers d'appareils [7].

### 5.2.1. Aléatoire copolymère

Le copolymère statistique de PP contient des chaînes avec un petit nombre (1,5 %-6 %) d'unités d'éthylène ou d'oléfines supérieure) telles que le butane ou l'hexane), dispersées de manière aléatoire parmi les unités de propylène. La présence d'éthylène dans la chaîne polymère réduit la tendance à cristalliser et se traduit par une résistance aux chocs améliorée, un toucher plus doux, une plus large gamme de Capacité thermique, une résistance au froissement et une clarté améliorée. Certains dès la rigidité inhérente de l'homopolymère est sacrifiée par copolymérisation. En raison de la cristallinité inférieure, les copolymères aléatoires ont un point de fusion et une densité inférieure que l'homopolymère. Cette combinaison rend les copolymères attrayants pour les articles ménagers moulés par injection, le thermoformage, les étirements-soufflage et les films [4]. La qualité de copolymère aléatoire peut être utilisée pour remplacer le PVC, le PS et le PET dans les emballages alimentaires et applications stationnaires [6].

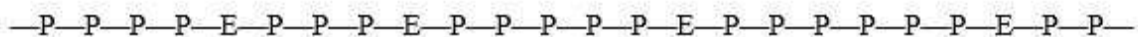


Figure I.5: Aléatoire copolymère [3]

### 5.2.2. Copolymère en Bloc

L'homopolymère PP est copolymérisé avec de d'éthylène. Dans les copolymères séquencés, la teneur en éthylène est beaucoup plus élevée que les copolymères statistiques. La partie copolymérisée du matériau est caoutchouteux et forme une phase dispersée distincte dans la matrice PP. En conséquence, le PP copolymérisé en bloc est beaucoup plus résistant que le PP homopolymérisé et peut résister à un impact plus élevé même à basse température, mais au détriment de la transparence et du point de ramollissement. Les principales applications du PP copolymérisé à blocs sont similaires à celles du PP modifié à l'élastomère, mais où l'exigence de propriété d'impact n'est pas si critique [1].

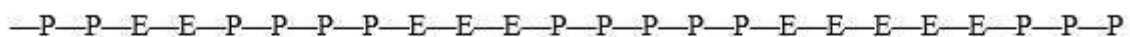


Figure I.6: Copolymère en Bloc

## 6. Caractéristiques du PP

Le polypropylène est un polymère thermoplastique qui possède un certain nombre de propriétés uniques qui le rendent utile dans un large éventail d'applications. Certaines des propriétés clés du polypropylène comprennent :

### 6.1. Density

Dans le cas du polypropylène (PP), il a une densité typique de  $0,9 \text{ g/cm}^3$ , ce qui en fait le plus léger parmi les thermoplastiques largement utilisés. Cette caractéristique permet aux fabricants de produire plus d'articles pour un poids donné de polymère, ce qui en fait une option rentable.

La densité du PP est relativement stable dans toute la gamme des homopolymères et des copolymères, avec peu de changement de densité résultant des changements dans le degré de cristallinité. Cependant, la densité des polymères aléatoires est légèrement inférieure à celle des grades homopolymères. La densité du PP peut également être influencée par l'ajout de charges ou de matériaux de renforcement .

Dans l'ensemble, la densité du PP est un facteur important à prendre en compte dans sa sélection pour diverses applications, car elle peut avoir un impact sur le poids, la résistance et les performances du produit final [8].

### 6.2. Propriétés thermiques

Le polypropylène (PP) est un polymère thermoplastique qui présente une gamme de caractéristiques thermiques en fonction de sa structure moléculaire, de ses conditions de traitement et de ses additifs. Voici quelques-unes des caractéristiques thermiques clés du PP :

Tableau I.1: Propriétés thermiques du polypropylène [3].

Propriétés thermiques	Definition de la propriété
<b>Température de transition vitreuse</b>	La température de transition vitreuse du PP se situe généralement entre -10 °C et -20 °C. En dessous de cette température, le PP est à l'état vitreux et est relativement cassant. Au-dessus de cette température, le PP devient plus souple et caoutchouteux.
<b>Température de fusion</b>	La température de fusion du PP est d'environ 160°C à 170°C, ce qui est relativement bas par rapport à d'autres thermoplastiques. Cette faible température de fusion rend le PP facile à traiter et à mouler dans diverses formes.
<b>Température de déflexion thermique</b>	La température de déflexion thermique est la température à laquelle un matériau plastique se déforme sous une charge spécifiée. L'HDT du PP peut varier d'environ 60°C à 100°C, selon les conditions de traitement et les additifs utilisés.
<b>Conductivité thermique</b>	Le PP est un conducteur relativement pauvre de la chaleur, ce qui signifie qu'il a une faible conductivité thermique. Cette propriété peut être bénéfique dans certaines applications où l'isolation est importante.
<b>Expansion thermique</b>	Le PP présente un coefficient de dilatation thermique relativement élevé, ce qui signifie qu'il se dilate et se contracte considérablement avec les changements de température. Cette propriété peut être importante à prendre en compte dans les applications où la stabilité dimensionnelle est critique.

### 6.3. Propriétés mécaniques

Le polypropylène est un polymère thermoplastique couramment utilisé dans la fabrication d'une grande variété de produits en raison de ses propriétés mécaniques intéressantes. Voici quelques-unes de ses propriétés mécaniques les plus courantes :

Tableau I.2: Propriétés mécaniques du polypropylène [8].

Propriétés mécaniques	Définition de la propriété
<b>Résistance à la traction</b>	Le PP a une excellente résistance à la traction, avec une résistance typique de 30 à 45 MPa.
<b>Résistance à la flexion</b>	Le PP est également résistant à la flexion, avec une résistance typique de 30 à 45 MPa.
<b>Module d'élasticité</b>	Le PP a un module d'élasticité élevé, ce qui signifie qu'il peut résister à des charges importantes sans se déformer de manière permanente. Le module d'élasticité typique du PP est de 1500 à 2000 MPa.
<b>Dureté</b>	Le PP est relativement dur, ce qui signifie qu'il résiste à l'abrasion et à l'usure. Sa dureté varie généralement entre 60 et 90 Shore D.
<b>Ténacité</b>	Le PP est également ténace, ce qui signifie qu'il peut absorber des chocs importants sans se briser. Sa ténacité varie généralement entre 10 et 20 kJ/m <sup>2</sup>
<b>Résistance à la température</b>	Le PP peut être utilisé à des températures allant jusqu'à 100 °C en continu, et jusqu'à 120 °C de manière intermittente.

Il convient de noter que ces propriétés mécaniques peuvent varier en fonction de la formulation exacte du PP, du taux de cristallinité, de la méthode de transformation utilisée et des conditions d'utilisation [8].

#### 6.4. Propriétés électriques

Le polypropylène est un polymère thermoplastique largement utilisé dans les applications industrielles et domestiques. En termes de propriétés électriques, voici quelques points clés à retenir :



Tableau I.3: Propriétés électriques du polypropylène [9].

Propriétés électriques	Definition de la propriété
<b>Résistance électrique élevée</b>	Le polypropylène a une résistance électrique élevée, ce qui signifie qu'il peut résister à un courant électrique élevé sans se dégrader. Sa résistance électrique est de l'ordre de $10^{16}$ ohms-cm, ce qui est élevé par rapport à d'autres matériaux polymères.
<b>Faible constante diélectrique</b>	La constante diélectrique est une mesure de la capacité d'un matériau à stocker une charge électrique. Le polypropylène a une constante diélectrique relativement faible de 2,2 à 2,3, ce qui signifie qu'il ne stocke pas beaucoup de charges électriques et ne se polarise pas facilement en présence d'un champ électrique.
<b>Bonne stabilité thermique</b>	Le polypropylène est connu pour sa stabilité thermique élevée, ce qui signifie qu'il peut résister à des températures élevées sans se dégrader. Cette propriété est importante dans les applications électriques où le matériau doit être capable de résister à des températures élevées sans perdre ses propriétés électriques.

### 6.5. Propriétés optiques

Le polypropylène est un polymère thermoplastique qui possède plusieurs propriétés optiques intéressantes. En voici quelques-unes :

**Tableau I.4:** Propriétés optiques du polypropylène [10].

Propriétés optiques	Definition de la propriété
<b>Transparence</b>	Le polypropylène est transparent, ce qui signifie qu'il laisse passer la lumière sans la diffuser. Cependant, la transparence dépend de la qualité du polymère, de son épaisseur, de sa couleur et de son état de surface.
<b>Indice de réfraction</b>	L'indice de réfraction du polypropylène est d'environ 1,49, ce qui le rend légèrement plus réfringent que l'air. Cette propriété peut être utilisée pour fabriquer des lentilles optiques.
<b>Dispersion</b>	Le polypropylène présente une faible dispersion de la lumière, ce qui signifie que les différentes longueurs d'onde de la lumière se propagent à peu près à la même vitesse dans le matériau. Cela permet d'éviter les aberrations chromatiques dans les lentilles optiques.
<b>Polarisation</b>	Le polypropylène est un matériau non polaire, ce qui signifie qu'il ne polarise pas la lumière. Cette propriété peut être utilisée pour fabriquer des films optiques polarisants.

## 6.6. Propriétés de surface

Le polypropylène est un polymère thermoplastique couramment utilisé dans de nombreux domaines industriels en raison de ses excellentes propriétés mécaniques et chimiques. Les propriétés de surface du polypropylène peuvent être affectées par différents facteurs, tels que les traitements de surface, les additifs et les conditions d'utilisation. Voici quelques propriétés de surface du polypropylène [11] :

**Tableau I.5:** Propriétés de surface du polypropylène [11].

Propriétés de surface	Definition de la propriété
<b>Tension de surface</b>	La tension de surface est une mesure de l'énergie nécessaire pour étendre la surface d'un matériau. La tension de surface du polypropylène est généralement faible, ce qui le rend difficile à mouiller. Cependant, en utilisant des traitements de surface tels que la flamme, la corona ou le traitement au plasma, la tension de surface peut être augmentée pour améliorer l'adhérence.
<b>Résistance à l'abrasion</b>	Le polypropylène a une bonne résistance à l'abrasion, ce qui le rend résistant à l'usure et à la dégradation de la surface lorsqu'il est soumis à des conditions d'utilisation difficiles.
<b>Rugosité de surface</b>	La rugosité de surface du polypropylène dépend du processus de fabrication et de la méthode de traitement de surface. Les surfaces rugueuses peuvent offrir une meilleure adhérence et une meilleure liaison, tandis que les surfaces lisses peuvent être plus faciles à nettoyer.
<b>Hydrophobie</b>	Le polypropylène est un matériau hydrophobe, ce qui signifie qu'il repousse l'eau. Cela peut être bénéfique dans certaines applications, telles que la fabrication de bouteilles d'eau, où il est important de garder le contenu sec.
<b>Résistance aux UV</b>	Le polypropylène a une résistance élevée aux rayons UV, ce qui le rend approprié pour une utilisation en extérieur et dans des conditions de forte exposition au soleil.

### 6.7. Propriétés acoustiques

Le polypropylène possède d'excellentes propriétés d'amortissement acoustique, ce qui signifie qu'il est efficace pour réduire ou éliminer les vibrations et les craquements qui peuvent se produire dans les matériaux fabriqués à partir d'autres plastiques. Cela est dû au fait que les vibrations sonores sont fortement inhibées dans le PP. Cependant, le PP n'est pas bon pour l'absorption acoustique de l'air portable en raison de sa rigidité. Cela signifie que des mesures supplémentaires, telles qu'un revêtement ou l'installation par ressort d'une source de bruit, sont nécessaires pour obtenir une isolation phonique efficace. [3].

### 6.8. Comportement biologique

En termes de comportement biologique, le polypropylène est relativement inerte et non toxique pour les organismes vivants en termes de comportement biologique. De nombreuses études ont examiné les effets du polypropylène sur la santé humaine et animale, en conclusion, le polypropylène est considéré comme biologiquement sûr pour les organismes vivants, mais il est important de prendre des mesures pour gérer correctement les déchets de polypropylène afin de minimiser les impacts environnementaux négatifs, Voici quelques propriétés de biologique du polypropylène :

#### 6.8.1. Évaluation selon la législation sur l'alimentation et l'eau

L'utilisation du polypropylène (PP) dans les applications de contact avec les aliments et l'eau est courante en raison de sa nature non toxique et non cancérigène. Cependant, l'utilisation d'additifs dans les formulations de PP peut entraîner la migration de substances nocives vers les aliments ou l'eau, entraînant des problèmes organoleptiques ou une toxicité. La migration des additifs est influencée par le temps et la température, ainsi que par le poids moléculaire du PP [12].

#### 6.8.2. Résistance aux micro-organismes

Le polypropylène (PP) n'est pas un milieu nutritif pour les micro-organismes et n'est donc pas attaqué par eux. Il ne peut pas être pénétré par des micro-organismes à condition que l'épaisseur de la paroi ou du film soit d'au moins 0,1  $\mu\text{m}$ . Dans des parois plus minces, de petits pores peuvent être introduits pendant la fabrication. Des additifs de faible poids moléculaire, tels que des plastifiants, des lubrifiants, des stabilisants et des antioxydants, peuvent migrer vers la surface des composants en plastique et favoriser la croissance de micro-organismes. Les effets néfastes peuvent être facilement observés par la perte de propriétés, le changement de qualité esthétique, la perte de transmission optique et l'augmentation de la fragilité. Des

conservateurs, également appelés fongicides ou biocides, sont ajoutés aux matériaux plastiques pour empêcher la croissance de micro-organismes [13].

### 6.9. Additifs

Les additifs sont souvent ajoutés au polypropylène pour améliorer ses propriétés physiques et mécaniques ou pour répondre à des exigences spécifiques de l'application. Voici quelques exemples d'additifs couramment utilisés avec le polypropylène :

**Tableau I.6:** Additif du polypropylène [11].

Additif	Definition de la propriété
<b>Agents de couplage</b>	Ces additifs améliorent l'adhésion entre le polypropylène et d'autres matériaux, tels que les fibres de verre ou de carbone. Ils permettent d'obtenir des composites renforcés.
<b>Agents de modification de choc</b>	Ces additifs augmentent la résistance au choc du polypropylène, le rendant plus résistant aux impacts.
<b>Antioxydants</b>	Ces additifs protègent le polypropylène contre l'oxydation causée par la chaleur, la lumière et l'oxygène.
<b>Anti-UV</b>	Ces additifs protègent le polypropylène contre les effets nocifs des rayons ultraviolets du soleil.
<b>Agents ignifuges</b>	Ces additifs améliorent la résistance au feu du polypropylène, le rendant moins inflammable.
<b>Agents de lubrification</b>	Ces additifs réduisent la friction entre les particules de polypropylène lors de la fabrication, ce qui facilite le traitement du matériau.
<b>Agents de couleur</b>	Ces additifs sont utilisés pour donner de la couleur au polypropylène

### 6.10. Performances en service

Le polypropylène (PP) est un matériau thermoplastique qui possède de nombreuses propriétés intéressantes pour une utilisation en service. Voici quelques exemples de performances en service du polypropylène :

Tableau I.7: Performances en service du polypropylène [11].

Performances en service	Definition de la propriété
<b>Résistance à la corrosion</b>	Le polypropylène est résistant à la corrosion causée par les acides et les alcalis, ce qui le rend utile dans les industries chimiques.
<b>Résistance à la fissuration sous contrainte</b>	Le polypropylène a une résistance élevée à la fissuration sous contrainte, ce qui signifie qu'il est capable de résister à des charges élevées sans se casser.
<b>Faible taux d'absorption d'eau</b>	Le polypropylène a un faible taux d'absorption d'eau, ce qui le rend utile dans les applications où l'exposition à l'eau est courante.
<b>Résistance à la fatigue</b>	Le polypropylène possède une bonne résistance à la fatigue, ce qui le rend utile dans les applications où des charges répétitives sont courantes.
<b>Résistance à la chaleur</b>	Le polypropylène peut résister à des températures élevées, ce qui le rend utile dans les applications où une résistance à la chaleur est nécessaire.
<b>Stabilité dimensionnelle</b>	Le polypropylène est dimensionnellement stable, ce qui signifie qu'il ne se déformera pas facilement sous des charges importantes.

## 7. Influence du Polypropylène sur la santé d'être humain /environnement

Le Polypropylène (PP) est un polymère thermoplastique largement utilisé dans une variété d'applications telles que les emballages, les textiles, les équipements médicaux et les composants automobiles. En général, le PP est considéré comme sûr pour une utilisation dans ces applications, mais il peut y avoir des préoccupations concernant son impact sur la santé humaine et l'environnement dans certaines circonstances.

En ce qui concerne la santé humaine, le PP est généralement considéré comme non toxique et non dangereux. Selon une étude publiée dans le Journal of Applied Toxicology, les

évaluations des risques ont montré que les expositions au PP n'ont pas entraîné de risques importants pour la santé humaine. Cependant, il convient de noter que certaines personnes peuvent être allergiques au PP ou aux additifs utilisés dans sa fabrication.

En ce qui concerne l'environnement, le PP est considéré comme un plastique relativement sûr, car il est recyclable et peut être réutilisé. Cependant, s'il est mal éliminé ou s'il est exposé à des conditions environnementales extrêmes telles que la chaleur ou la lumière, il peut libérer des produits chimiques qui peuvent être nuisibles pour l'environnement. De plus, le PP est également un polluant potentiel des océans, car il peut se décomposer lentement et se retrouver dans les écosystèmes marins.

Il est important de noter que les impacts potentiels du PP sur la santé humaine et l'environnement peuvent varier en fonction des conditions spécifiques d'utilisation et de gestion des déchets. Par conséquent, il est recommandé de suivre les pratiques de gestion des déchets appropriées et de minimiser l'utilisation de plastiques jetables chaque fois que possible [14].

## 8. Applications de Polypropylène

Le polypropylène est un groupe de polymères, pas seulement un polymère, Étant donné que les propriétés du polypropylène couvrent une large gamme, les applications du polypropylène sont très diverses, cette section traite des applications les plus importantes du polypropylène :

### a. Fibres et Tissus

Les fibres sont produites par différents types d'extrusion Opérations. Les fibres comprennent une membrane fendue ou un ruban fendu. Les avantages offerts par Polypropylène incluent une faible densité, qui Signifie un plus grand volume pour chaque poids, force, produit chimique donnée Résistance et résistance aux taches, Il existe diverses applications pour les fibres telles que le film fendu, la fibre centrale, le tissu non tissé et le mono filament [6].



**Figure I.7** : Processus d'extrusion de mon filament [6]

### **b. Cerclage**

L'épissage est similaire au film fendu, mais plus épais, atteignant 20 mm. Comme son nom l'indique, le cerclage est utilisé pour fixer de grandes poutres ou boîtes ou pour maintenir les piles ensemble. Il remplace la fixation en acier, la propriété la plus importante est la résistance, bien que la résistance à l'humidité soit également la caractéristique la plus importante du polypropylène. Il est produit soit par extrusion directe, soit à partir d'une feuille fendue. La direction Axe unique est appliquée par étirage. Des résines polymères homogènes à faible MFR (entre 1,0 et 1,5 g/10 min) sont utilisées pour cette application [2].

### **c. Film**

Le PP est un matériau polyvalent pour les films avec des propriétés mécaniques et chimiques exceptionnelles qui en font un choix populaire pour une variété d'applications industrielles et commerciales [1].

Les films en polypropylène (PP) dans une variété de sont largement utilisés pour des applications, y compris dans les emballages alimentaires, les étiquettes, les enveloppes à bulles, les sacs et les films agricoles. Les propriétés mécaniques, thermiques et optiques du PP en font le matériau de choix pour les films [6].

### **d. Feuille\ thermoformage**

Les feuilles de polypropylène (PP) sont souvent utilisées pour le thermoformage, un processus de fabrication qui implique le chauffage d'une feuille de plastique jusqu'à ce qu'elle soit malléable, puis son moulage sur un moule pour former une pièce en trois dimensions [15].

Les feuilles de PP sont populaires pour le thermoformage en raison de leur résistance à la chaleur, de leur rigidité, de leur légèreté et de leur transparence. Les feuilles de PP peuvent être thermoformées pour produire des pièces telles que des plateaux de service, des couvercles, des boîtes de rangement, des supports de présentation, des blisters, des plateaux de semis et des panneaux de signalisation.

En résumé, les feuilles de PP sont largement utilisées pour le thermoformage en raison de leur résistance à la chaleur, de leur rigidité, de leur légèreté, de leur transparence et de leur compatibilité avec les aliments. Le thermoformage de feuilles de PP peut produire une large gamme de pièces en trois dimensions pour des applications industrielles et commerciales [16].

### **e. Moulage par Injection**

Le moulage par injection est un processus de fabrication largement utilisé pour produire des pièces en plastique en grande quantité. Dans ce processus, des granulés de plastique sont



chauffés jusqu'à ce qu'ils soient fondus, puis injectés dans un moule pour prendre la forme désirée. Le moule est ensuite refroidi pour durcir la pièce, qui est ensuite éjectée [17].

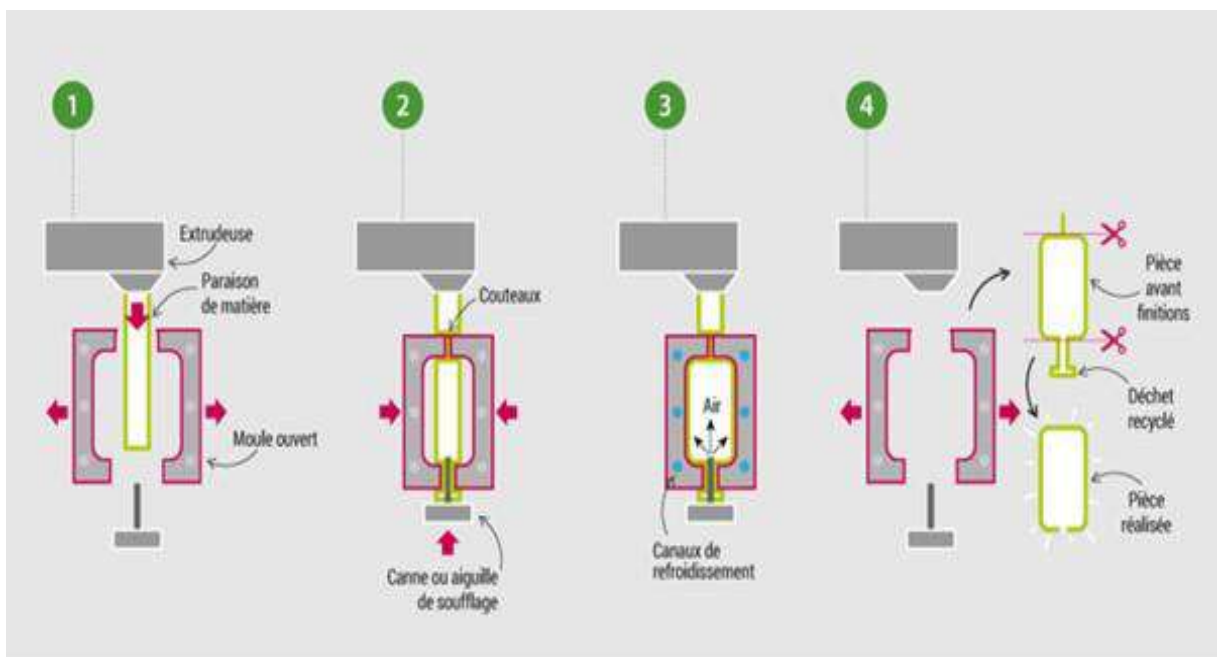


**Figure I.8:** Processus de moulage par injection [6]

Les propriétés de la pièce finie dépendent de nombreux facteurs, notamment de la formulation de la résine, de la conception du moule, des conditions de moulage, de la pression d'injection et de la vitesse d'injection. Pour produire des pièces de haute qualité, il est important de maîtriser ces facteurs et de suivre des processus de contrôle de qualité rigoureux [18].

#### f. Moulage par Soufflage

Le soufflage est un procédé de fabrication utilisé pour produire des pièces creuses en plastique, telles que des bouteilles, des récipients, des réservoirs, des jouets. Dans ce processus, un tube en plastique appelé préforme est chauffé et étiré dans un moule, puis de l'air est soufflé dans le tube pour le faire gonfler et prendre la forme du moule. Le moule est ensuite refroidi pour durcir la pièce, qui est ensuite extrudée, et le polypropylène est un matériau populaire pour le moulage par soufflage en raison de ses propriétés mécaniques, chimiques et thermiques. La qualité de la pièce finie dépend de nombreux facteurs, notamment la formulation de la résine, la conception du moule et les conditions de formage [16].



**Figure I.9 :** Processus de Moulage par Soufflage [19]

### g. Automobile

Le polypropylène est très présent dans les voitures et autres véhicules. Pour la plupart, les copolymères d'impact prédominent. L'une des utilisations originales était dans les boîtiers de batterie ; dans cette application, qui remonte à plus de 25 ans, le copolymère d'impact moulé par injection, de couleur noire, a remplacé le caoutchouc dur noir. Maintenant, les étuis d'autres couleurs et de matériaux translucides naturels sont la norme. Une autre utilisation de longue date du PP dans une voiture a été pour les conduits de chauffage et de climatisation, qui sont pour la plupart invisibles. Les pales de ventilateur de différents types sont fabriquées à partir de PP rempli (généralement de talc) [6].

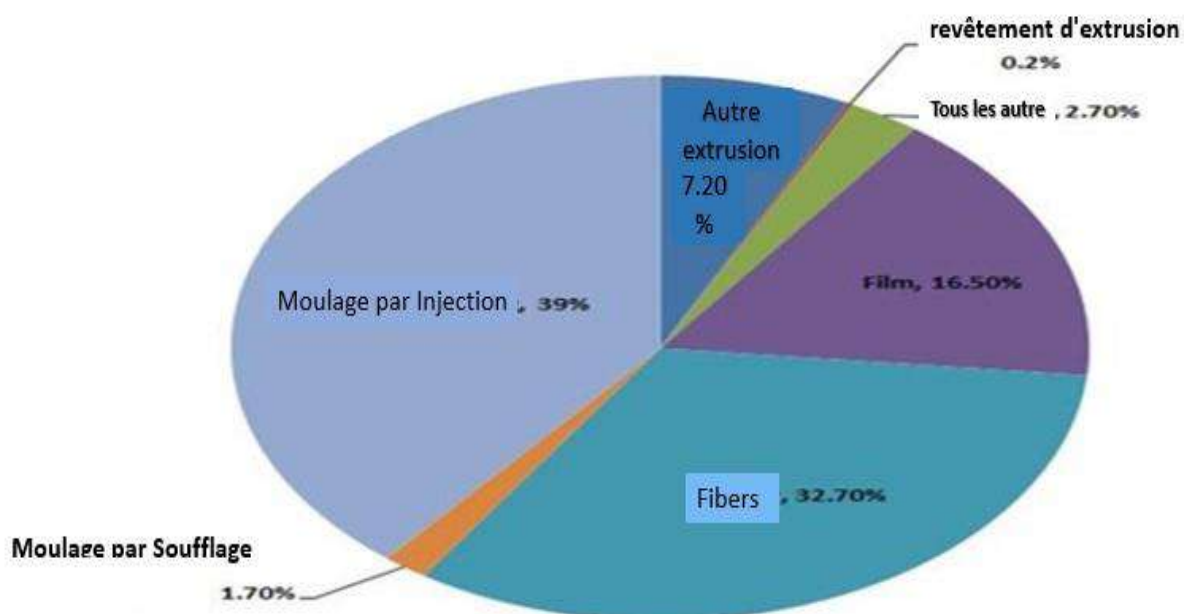


Figure I.10. Consommation mondiale de polypropylène par utilisation finale [6]

## 9. Conclusion

Le polypropylène est l'un des polymères les plus populaires dans l'industrie de l'emballage et des profilés, en raison de ses excellentes propriétés mécaniques et de sa légèreté. Cependant, sa grande utilisation a pour conséquence sa présence en grande quantité dans les décharges, ce qui en fait un candidat idéal pour le recyclage.

## 10. Références

1. Karger-Kocsis, Jozsef, éd. Polypropylène : une référence de A à Z. Vol. 2. Springer Science & Business Media, 2012
2. Karian, Harutun, ed. Handbook of polypropylene and polypropylene composites, revised and expanded. CRC press, 2003.
3. Tripathi, Devesh. Practical guide to polypropylene. iSmithers Rapra Publishing, 2002.
4. PlasticsEurope. (2022). Polypropylene (PP) - Production, Price and Market Demand. Récupéré le 2 avril 2023
5. Gao, Shang, Xuan Zhao, and Gousheng Liu. "Synthesis of tris (2-hydroxyethyl) isocyanurate homopolymer and its application in intumescent flame retarded polypropylene." *Journal of Applied Polymer Science* 134.13 (2017).
6. Maddah, Hisham A. "Le polypropylène en tant que plastique prometteur : un examen." *Suis. J. Polym. Sci* 6.1 (2016): 1-11.
7. Keck-Antoine, Klaus, et al. "Additives to design and improve the performance of multilayer flexible packaging." *Multilayer flexible packaging*. William Andrew Publishing, 2010. 37-56.
8. Busico, Vincenzo et Roberta Cipullo. "Microstructure du polypropylène." *Progress in Polymer Science* 26.3 (2001): 443-533
9. Karger-Kocsis, József, and Tamás Bárány. "Polypropylene handbook." Switzerland: Springer Nature (2019).
10. Maier, Clive, and Theresa Calafut. *Polypropylene: the definitive user's guide and databook*. William Andrew, 1998.
11. Mittal, V. (2018). *Polypropylene: Structure, blends and composites*. William Andrew Publishing
12. Rosato, Dominick V. *Plastics engineered product design*. Elsevier, 2003.
13. Parameswaranpillai, Jyotishkumar, et al. *Handbook of epoxy blends*. Springer International Publishing, 2017.
14. EFSA Panel on Food Contact Materials, Enzymes, Flavourings and Processing Aids (CEF), et al. "Safety assessment of the process 'Morssinkhof Plastics', used to recycle high-density polyethylene and polypropylene crates for use as food contact materials." *EFSA Journal* 16.1 (2018): e05117.
15. "Thermoforming of Single and Multilayer Laminates: Plastic Films Technologies, Testing, and Applications" de Syed Ali Ashter.
16. Harper, Charles A. *Handbook of plastics technologies: the complete guide to properties and performance*. McGraw-Hill Education, 2006.

17. Rosato, Dominick V., and Marlene G. Rosato. Injection molding handbook. Springer Science & Business Media, 2012.
18. Li, Xiping, et al. "Aluminum/polypropylene composites produced through injection molding." *Journal of Materials Processing Technology* 255 (2018): 635-643.
19. <https://www.poetic-amenagement.fr/nos-savoir-faire/> consulté le 27/05/2023 à 20h 30 min.

---

# **CHAPITRE II: Recyclage du Polypropylène**

---

## 1. Introduction

Le plastique a un impact significatif sur l'environnement tout au long de son cycle de vie, depuis son extraction en tant que matière première jusqu'à sa transformation en produits manufacturés, son utilisation, son recyclage ou son élimination en tant que déchet [1]. Afin de préserver les ressources naturelles pour les générations futures et de favoriser le développement durable, des mesures réglementaires sont actuellement prises voire le recyclage est obligatoire [2]. Il est donc important de trouver des solutions pour réduire l'impact environnemental des plastiques et améliorer leur gestion.

## 2. Quelques données statistiques

Le plastique est omniprésent dans notre vie quotidienne, utilisé pour une multitude d'applications allant des maillots de bain aux pare-chocs automobiles, en passant par l'emballage, l'agriculture, l'électroménager, la construction et les objets de loisirs. Ce matériau a connu un développement foudroyant, dépassant largement celui de tous les autres matériaux.

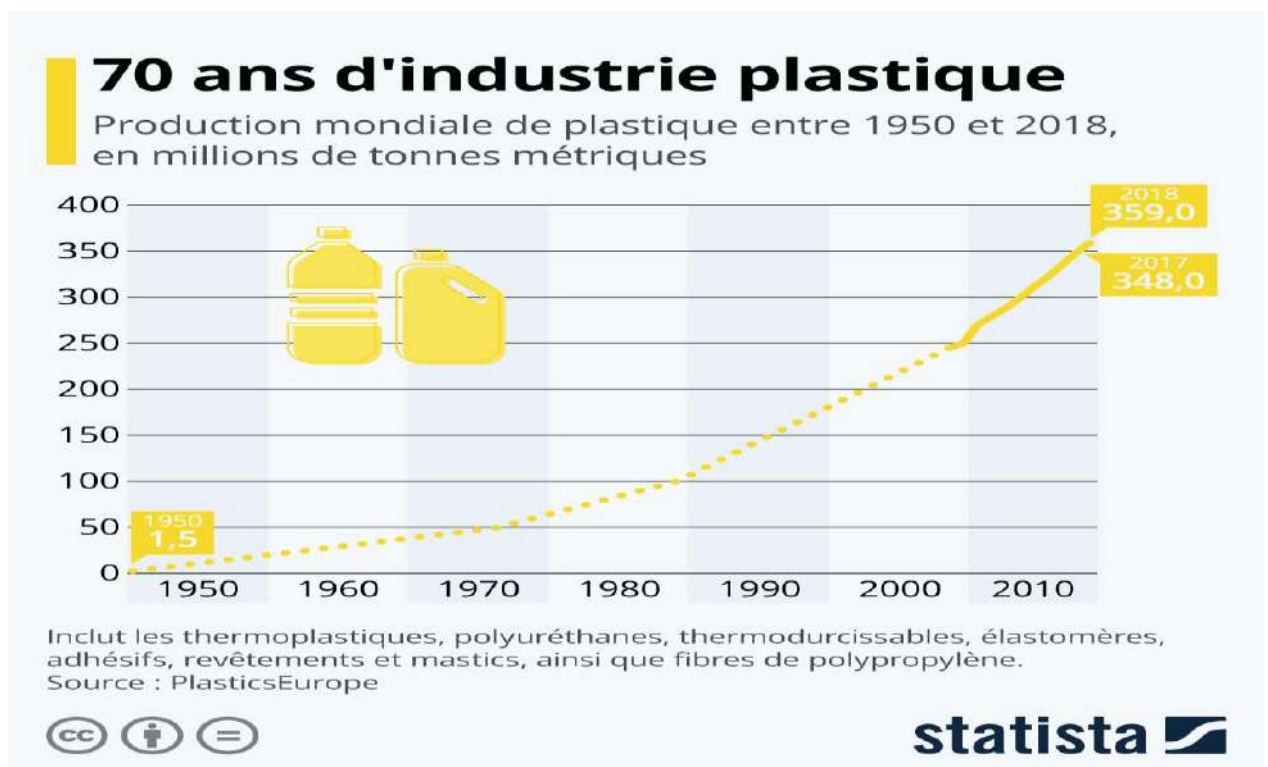


Figure II.1: Évolution de la production mondiale du plastique [3].

Cependant, le principal problème du plastique est son élimination. En effet, en raison de sa légèreté, il peut facilement s'envoler et se retrouver dans les fonds marins, tuant la faune et la flore marine, ainsi que sur les bords des routes. Il est important de noter qu'une quantité colossale de 100 millions de tonnes de plastique pourrait recouvrir la terre avec un film d'une épaisseur de seulement 1  $\mu\text{m}$  [4]. De plus, un sac plastique, un gobelet ou une assiette ont une durée de vie de plusieurs centaines d'années, ce qui aggrave encore le problème.

Lorsque le plastique n'est pas récupéré, il devient un désastre environnemental. Dans le cas contraire, il est généralement mis en décharge ou brûlé, mais la mise en décharge est maintenant interdite et l'incinération est devenue plus difficile en raison de la toxicité des fumées.

Des solutions doivent être trouvées pour gérer efficacement les déchets de plastique dans un contexte de développement durable.

### **3. Définition du Recyclage**

Le recyclage consiste à récupérer et à réutiliser des matériaux ou des articles pour leur donner une nouvelle vie. En d'autres termes, il s'agit de toute méthode visant à extraire de la valeur sous forme d'énergie ou de matière à partir de déchets, à n'importe quel stade du cycle de vie d'un produit. Cette valorisation des déchets permet de réduire leur impact environnemental et de contribuer à une économie circulaire plus durable.

### **4. Le recyclage des matières plastiques**

Le traitement des déchets plastiques nécessite d'énormes investissements et n'est pas neutre en énergie. Dès lors, les recycler semble plus économique et surtout plus propre. Le recyclage du polypropylène est un processus simple qui se déroule en plusieurs étapes. Il présente de nombreux avantages. Le polypropylène peut être recyclé plusieurs fois au cours de sa vie. En tant que tel, il peut être utilisé de différentes manières avec de grandes économies économiques. 100% recyclables, les produits obtenus sont de haute qualité et sont à nouveau recyclables.

Par exemple, en choisissant le recyclage plutôt que l'incinération, la France réduit les émissions de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et le soufre. Recycler le polypropylène et autres plastiques, c'est lutter contre la pollution et le réchauffement climatique [5].

### **5. Sources des déchets plastiques**

Il existe deux principales sources de déchets plastiques :

- Les déchets plastiques issus des sous-produits industriels. Sont des résidus de la production et ont une composition connue par le fabricant. Ils sont donc facilement collectés car les

stocks sont homogènes, non pollués et facilement identifiables. Ces déchets peuvent être recyclés directement par le producteur.

- Les déchets de post consommation. Les déchets de consommation sont collectés principalement dans les déchets ménagers et industriels non plastiques. Cependant, ces matériaux sont souvent contaminés, mélangés et incompatibles entre eux, ce qui rend difficile leur transformation en nouveaux produits par simple mélange ou pressage. Pour résoudre ce problème, de nouvelles techniques d'identification des déchets telles que l'utilisation de codes tamponnés ou de codes à barres apposés ou imprimés sur les produits peuvent être mises en œuvre.

## 6. Les méthodes de recyclage

Les méthodes de recyclage ou valorisation des déchets plastiques peuvent être divisées en quatre catégories :

### 6.1. Réutilisation du Polypropylène

Le produit sera utilisé dans sa forme actuelle, soit pour la même application ou pour une application différente.

### 6.2. Recyclage primaire (recyclage mécanique)

La définition fait référence à la réutilisation du matériau dans la même forme et avec la même valeur industrielle, ce qui englobe les déchets produits lors de la fabrication des produits ainsi que le recyclage en boucle fermée où un produit est collecté et recyclé en tant que [6]. Tel ou après une modification chimique [7], comme dans le cas des caisses de batterie en polypropylène qui ont été largement utilisées ces dernières décennies Le recyclage primaire est considéré comme la meilleure solution pour traiter les déchets solides car il ne nécessite pas de destruction [8-10].

### 6.3. Recyclage secondaire

C'est un processus dans lequel les plastiques usagés sont utilisés par les consommateurs et recyclés pour créer de nouveaux produits. Le recyclage secondaire des plastiques se déroule généralement en trois étapes principales :

- Collecte des déchets plastiques : Les déchets plastiques sont collectés auprès des consommateurs dans des poubelles ou des centres de recyclage.
- Tri des déchets plastiques : Les déchets plastiques sont triés selon le type de plastique. Des machines spéciales trient les matériaux utilisés selon le type de plastique présent.
- Recyclage des déchets plastiques : Les déchets plastiques sont transformés en granulés



de plastique, et ces granulés peuvent être utilisés pour fabriquer de nouveaux produits en plastique.

Le recyclage secondaire du plastique permet de réduire les déchets plastiques et de réduire leur impact sur l'environnement.

#### **6.4. Recyclage tertiaire**

Ce recyclage est également appelé valorisation énergétique. Il consiste en une décomposition chimique en éléments de base (monomères, oligomères ou carburants) qui peuvent être réutilisés dans les raffineries, la pétrochimie et la chimie. Cela peut conduire à de nouveaux matières plastiques ou du combustible [11,12].

Il existe quatre méthodes [13]:

##### **6.4.1. La pyrolyse**

La pyrolyse consiste à chauffer les déchets plastiques sous vide pour décomposer les particules en hydrocarbures liquides ou gazeux. Ces produits peuvent ensuite être utilisés dans les raffineries.

##### **6.4.2. L'hydrogénation**

Il s'agit de traiter de grosses particules de plastique avec de l'hydrogène et de la chaleur. Cela leur permet d'être convertis en huiles de carbone pouvant être utilisées dans les raffineries et les usines chimiques.

##### **6.4.3. La gazéification**

Les déchets plastiques sont chauffés en présence d'air ou d'oxygène. Le gaz de synthèse ainsi obtenu est constitué de monoxyde de carbone et d'hydrogène, qui peut être utilisé dans la production de méthanol et d'ammoniac ou comme agent réducteur dans la production d'acier.

#### **6.5. Recyclage quaternaire**

Appelé aussi la valorisation énergétique, ce procédé de recyclage des déchets plastiques consiste à brûler complètement les matériaux pour produire de la chaleur ou de l'électricité, sans chercher à récupérer cette énergie. Les déchets plastiques peuvent en effet fournir une importante quantité d'énergie qui peut être valorisée en récupérant la chaleur produite pour en faire de l'énergie électrique.

Le tableau 1 représente le PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) des polymères les plus courants ainsi que celui d'autres matériaux et matières en comparaison :


**Tableau II.1:** Le PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) des polymères les plus courants et d'autres matériaux [14].

<b>Matériau – matière</b>	<b>PCI Matériau pur (en MJ/Kg)</b>	<b>PCI Déchets (en MJ/Kg)</b>
PP	44	24
PE	43	22
PS	40	22
PET	22	12
PVC	17	9
Fioul domestique	44	
Aluminium fin	31	25
Houille	29	
Papier carton	16	8
Bois	16	

Cependant, il convient de noter que la dégradation de la plupart des matériaux plastiques peut générer des composés toxiques tels que de l'acide chlorhydrique, de l'acide nitrique ou de l'acide sulfurique, en raison de la structure des polymères de base (tels que le polychlorure de vinyle, les polyamides ou les caoutchoucs) ou de la présence d'adjuvants chimiques.

## 7. Application de matières plastiques avant et après recyclage mécanique ( P P ) [15]

Tableau II.2: application polypropylène après recyclage [15]

	Applications primaires des plastiques	Applications secondaires après recyclage mécanique
	Pots à yaourt, barquettes pour Margarine, caisses à claire-voie, plats pour micro-ondes, Emballages médicaux, pièces pour automobiles, tapis et fibres, pièces d'appareils électriques, meubles de jardin, bouchons de bouteilles/flacons.	Caisses à claire-voie, palettes, emballages pour des liquides techniques comme pots de peinture, pièces pour automobiles, châssis cachés, pièces pour du matériel électrique, batteries pour automobiles, caisses à outils, mobilier de jardin, textile, bacs à fleurs.

## 8. Recyclage sous forme de mélanges de déchets de polymères

Il peut être pratique (séparation précise) ou économique (évite l'étape de tri précis et réduit le coût de recyclage) intéressant de recycler les déchets plastiques sous forme de mélanges contenant deux ou plusieurs polymères [2].

Les polymères étant souvent incompatibles, les propriétés des mélanges obtenus sont généralement moindres ou insignifiantes que celles des polymères d'origine.

Ces mélanges sont souvent utilisés pour fabriquer des pièces volumineuses ou des produits qui ne nécessitent pas de propriétés élevées [16].

## 9. Elimination des déchets

L « élimination finale » fait référence à l'élimination des déchets sans récupération d'aucune valeur physique ou environnementale. C'est la pire option pour la protection de l'environnement, en particulier avec l'incapacité du plastique à se biodégrader, ce qui conduit à son accumulation dans les décharges publiques pendant de nombreuses années.

Un exemple horrible peut être mentionné ici, qui est la propagation des sacs en plastique sur les plages et dans les mers, car ces sacs laissent un impact négatif sur la vie marine lorsqu'ils se décomposent et interfèrent avec d'autres déchets.

## 10. Logo en matière recyclée

Des logos sont souvent placés sur nos emballages pour nous faire connaître des informations importantes sur les produits et pour identifier les caractéristiques de l'emballage. Cependant, sachez que tous les logos n'indiquent pas que l'emballage est recyclable. Par exemple, un numéro est placé sur les emballages pour identifier le type de plastique utilisé pour les fabriquer.

Ces images fournissent diverses illustrations de différents types de plastiques.



Les étiquettes en plastique avec des numéros font référence au SPJ Resin Identification Coding System (en anglais SPJ Résine Identification Coding System) et ont été développées par la Plastics Industries Association en 1988.

Bien que les logos et les numéros imprimés sur les emballages soient utiles, assurez-vous toujours de la recyclabilité en vous renseignant auprès des fournisseurs et des fabricants.

### 10.1. Le système de 7 codes

Le plastique doit être trié selon son type pour un recyclage approprié, car chaque type de plastique a des propriétés différentes. À cette fin, l'industrie des plastiques a créé un système de sept codes, qui figurent au bas du produit.

Le logo est accompagné d'un numéro qui correspond à un type de plastique spécifique, afin de faciliter au mieux le processus de tri pour le recyclage :

Il est utilisé pour les bouteilles d'eau et de boissons gazeuses ...



**Figure II.2** : Polyéthylène Téréphtalate (PET).

C'est le type le plus recyclable, et bien qu'il soit le type le plus sûr pour la fabrication de bouteilles en plastique, de récentes études italiennes ont conclu que les niveaux de DEHP (un phtalate, disruptif endocrinien probablement cancérigène pour l'homme dans l'eau) après stockage de l'eau pendant plus de neuf mois dans Bouteilles en PET.



**Figure II.3 :** Polyéthylène haute densité ou High Densité Polyéthylène (PEHD)

Il se caractérise par une densité et une dureté élevée, une résistance à la corrosion, aux rayons ultraviolets et aux influences extérieures. Il est utilisé dans de nombreux domaines industriels tels que :

Fabrication de tuyauteries et raccords industriels, fabrication d'outils et matériels agricoles, fabrication d'emballages et carters...



**Figure II.4:** Le polychlorure de vinyle (PVC).

C'est également un matériau bon marché, léger et facilement recyclable, ce qui en fait un matériau idéal pour une utilisation dans de nombreuses applications industrielles différentes.

Le deuxième type de plastique le plus utilisé au monde après le polyéthylène, et la fabrication et la combustion de ce type non recyclable entraîne la libération de substances toxiques telles que les dioxines, qui sont cancérigènes et perturbent les hormones. Au contact d'aliments chauds ou visqueux, le PVC peut également libérer des produits chimiques tels que des adipates ou des phtalates nocifs pour l'homme.

Il est utilisé dans de nombreux domaines d'applications industrielles et commerciales, tels que les emballages alimentaires, les conduites d'eau et les conduits électriques.



**Figure II.5:** Polyéthylène basse densité ou Low Densité Polyéthylène(LDPE).

Il est largement utilisé dans la fabrication de films plastiques pour l'emballage, de sacs en plastique légers, de sacs à provisions, de sacs chirurgicaux, de sacs à ordures et d'un large éventail d'autres applications industrielles qui nécessitent un matériau plastique souple et transparent.

Il a une grande formabilité et une bonne résistance aux UV et à la corrosion.

À utiliser pour certaines tasses pour bébé, certaines bouteilles d'eau de sport réutilisables et des contenants alimentaires réutilisables.



**Figure II.6 :** Polypropylène (PP).

C'est un plastique dur et léger, facile à traiter et à façonner.

Il est couramment utilisé dans diverses applications telles que les emballages alimentaires et les isolants à usage unique, car il présente certains inconvénients, notamment une faible résistance à la chaleur, ce qui en fait un cancérigène et une menace pour l'environnement.



**Figure II.7 :** Polystyrène (PS).

Utilisé de préférence pour le tableau de bord et l'isolation.



**Figure II.8 :** Autres plastiques, les polyamides (PA) et les polycarbonates (PC).

## 11. Recyclage du polypropylène

Le polypropylène doit son succès à ses propriétés polyvalentes. De plus, le polypropylène est utilisé dans les moulages industriels et automobiles, les tuyaux, les grands et petits contenants tels que les emballages de produits chimiques (ménagers ou non), les boîtiers de batterie de voiture, etc. On peut noter ici que pour ces usages, l'utilisation répétée dans le même produit ne représente aucun souci de santé [17].

L'effet du recyclage multiple sur les propriétés du polypropylène est que le polymère a tendance à se dégrader du fait des contraintes thermomécaniques qu'il subit lors de son moulage. Le polypropylène subit principalement une scission de chaîne. Cette dégradation entraîne des modifications des propriétés mécaniques et rhéologiques des recyclas [18].

Le problème du polypropylène recyclé est son MFI (indice de fluidité) réduit, ce qui en fait un grade inférieur. Son application doit donc être modifiée.

Pour pallier ce problème, différentes approches peuvent être adoptées :

- Application alternative : Réutilisation. Par exemple, du polypropylène pour l'extrusion au polypropylène recyclé pour l'injection ou la compression.
- Mélange : mélange de polypropylène recyclé avec d'autres polymères. Mais ces mélanges sont généralement utilisés dans des applications où une défaillance mécanique due à une éventuelle incompatibilité [2].
- Mélanges avec du polypropylène vierge : Des études similaires ont été réalisées pour le polyéthylène [19].

## 12. Les avantages et les inconvénients du recyclage

### 12.1. Les avantages

Le recyclage a deux avantages principaux [16] :

- La réduction de l'espace de décharge
- Diminution des émissions des gaz des décharges et des incinérateurs

Utiliser les déchets comme ressource, c'est aussi préserver les matières premières naturelles. Et cela peut être plus économique.

### 12.2. Les inconvénients

- Nécessaire à la proximité des filières de valorisation avec le lieu de production des déchets afin de réduire le transfert de déchets (réduction de la pollution du produit).
- Bonne répartition des usines de recyclage pour atteindre l'efficacité dans les différentes régions.

- Il est important que le dépistage initial de la population soit aussi précis que possible.
- Les gouvernements et les entreprises devraient fournir davantage de ressources et de financements pour développer les infrastructures de recyclage et améliorer le processus de tri et de conversion.
- L'effet de la qualité du produit final recyclé en raison de son mélange avec d'autres matériaux.
- Émission de gaz à effet de serre et pollution de l'air due à l'utilisation d'électricité et de carburant pour le processus de recyclage.
- L'utilisation de produits chimiques pour nettoyer et éliminer les impuretés, ce qui cause des dommages à l'environnement s'il n'est pas éliminé correctement.

### 13. Conclusion

Si l'intérêt d'un mélange de polymères thermoplastiques se définit clairement comme sa "première vie", on constate que le recyclage commence la plupart du temps par le tri, dans le but le plus souvent de récupérer le polymère avec le moins d'impuretés possible.

Le polypropylène est un polymère très important dans la consommation partout dans le monde. A ce titre, il est un composant majeur des déchets plastiques et peut être retenu comme un matériau « type » pour le développement de filières de recyclage aboutissant à des produits d'intérêt économique.

Le recyclage mécanique de ce matériau est un procédé non destructif qui semble être la meilleure solution pour éliminer ses déchets. Ses avantages sont nombreux, tant environnementaux (réduction de divers types de pollution) qu'économiques (recyclage de certains matériaux achetés en devises).



## 14. References

- [1]. Mary Beth Shriver, Kurt Beiter and Kos Ishii, “Characterisation of recycled Injection molded plastics for material life-cycle analysis”, SPE ANTEC Proceedings, May, 1994.
- [2]. A. Colbeaux, “Compatibilisation de mélanges PP/PE par extrusion réactive”, thèse de doctorat. Laboratoire des Matériaux Macromoléculaire de l’INSA de Lyon. 2001
- [3].<https://fr.statista.com/infographie/20457/evolution-de-la-production-mondiale-de-plastique-le-20/05/2023> à 21h 45 min
- [4]. L. Utracki, “Commercial Polymer Blends” , Chapman and Hall Ed., London, 1998,p658.
- [5].Alexandre Thomas, bretagne-energie.fr 2021, Recyclage du polypropyléné, [www.bretagne-energie.fr/materiaux/recyclage-plastique-polypropylene-pp/](http://www.bretagne-energie.fr/materiaux/recyclage-plastique-polypropylene-pp/) consulté le 28/03/2023 à 22h 15 min
- [6]. Patrick Di Marco, Charles F. Eubanks and Kos Ishii, “Compatibility Analysis of Product Design for Recyclability and Reuse”, ASME Computers In Engineering Conference, Ohio State University, 1994, p105-112.
- [7]. Ehring J.R.,” Plastic Recycling Products and Processes”, Ed.Carl Hanser : New York, 1992, Chapter1.
- [8]. Papaspyrides C., D. Poulakis J.G., “The Polymeric Materials Encyclopedia”, Salamone J.C.Ed., 1996, p7403.
- [9]. Sitek F., Herbst H. Hoffmann K., and Pfaendnert R., “Upgrading of Used Plastics: Why and How?”, Davos Recycle, international Forum and Exposition, 1994.
- [10]. Desarnaults J., “Plastic Waste Recovery-Objectives for the Year 2002” , ELF Atochem. Recycle, Environnemental Technologies Davos, 1995.
- [11]. Bockhom H., Hornung A., et Hornung U., “Stepwise Pyrolysis for recycling of plastic mixtures”, Macromolecular symposia, 1998, vol. 135, p35-41.
- [12]. Guy L., « Contribution au recyclage des Polyéthylènes par une thermolyse Ménagée en solution : Controles, Mécanismes et Valorisation ». Thèse d’Etat de l’Université Claude Bernard-Lyon , 1997, p182.
- [13]. T. Kossentini Kallel,, « Etude de mélanges PE/PS : Contribution au recyclage » . Thèse d’Etat de l’Institut national des Sciences Appliquées de Lyon, 2003, p8.
- [14]. Centre National du Recyclage, « Les emballages plastiques : de la fabrication à la valorisation » , Rapport1999, p18.
- [15]. Hans-hewing Kusch, Christopher jhon phimmer, nicole hymans, pierre decroly, materiaux polymères : propriétés mécaniques et physiques, press polytechniques et universitaires romandes, suisse 2001.

- [16]. U.S. Environmental Protection Agency, "Handbook: Recycling and reuse of material found in superfund sites", Office of Research and development, Washington, 1994.
- [17]. G. Edward, M. O'shea, G. Peeters, K. Thomson, A. Postona and R. Rosu, "Creating new recycling options for post-consumer bottle grade HDPE " , Cooperative Research Center for Polymers , Report N°CRC-P-TR-032, 2001.
- [18].G.Tetris, "Degradation of polyolefines during various recovery processes", Macromolecular symposia, 1999, vol.144, p471-479.
- [19]. P. Miller, " Linearity and nonlinearity of mechanical properties in blends of virgin and recycled HDPE", Journal of Applied Polymer Science, vol 82(14), 3505 – 3512, 2001.

---

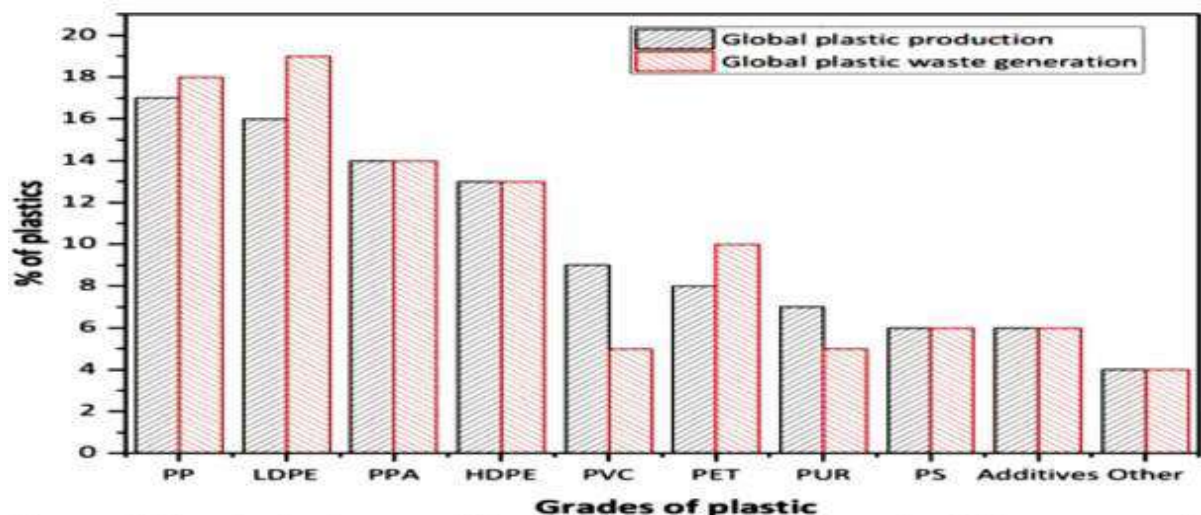
# **CHAPITRE III : Impacts économiques et environnementales**

---

## 1. Introduction

La production et la consommation de plastique ont considérablement augmenté au cours des dernières décennies en raison de leur faible coût et de leur adéquation à une variété d'applications. Le polypropylène (PP) est l'un des plastiques les plus largement utilisés [1], avec une grande variété d'applications, notamment les emballages, les textiles, les équipements de laboratoire et les composants automobiles. La demande mondiale de (PP) (17%) et sa contribution à la génération de déchets (18%) (**Figure 1**) [2]. En raison de la forte consommation de (PP) et de son faible taux de valorisation entraînent des impacts environnementaux et économiques négatifs. Si le PP n'est pas manipulé correctement, il s'accumule dans les océans et les terres, où il devient un déchet qui met longtemps à se décomposer [3].

Sur le plan économique, le recyclage du polypropylène peut avoir un impact positif significatif. L'un des principaux impacts économiques du recyclage du polypropylène est de réduire l'utilisation des ressources naturelles dans la production de nouveau plastique [4].



**Figure III.1** : Production mondiale et génération de déchets de différents types de plastiques [2].

## 2. L'impact économique du processus de recyclage du polypropylène

### 2.1. Économiser les ressources naturelles

#### 2.1.1. Réduction de la consommation de ressources primaires

Au lieu d'utiliser des matières premières naturelles telles que le pétrole brut dans la production de nouveau polypropylène, des matériaux récupérés du processus de recyclage sont utilisés. Cela réduit le besoin d'extraire davantage de ressources naturelles et préserve l'équilibre de l'écosystème.

### **2.1.2. Économie d'énergie**

L'extraction et la fabrication de nouveaux plastiques nécessitent d'importantes quantités d'énergie. Cependant, le recyclage du polypropylène peut permettre des économies d'énergie considérables par rapport à la production de nouveaux plastiques. Le processus de recyclage réduit la nécessité de procédures de raffinage et de conversion thermique nécessaires dans la production de polymères primaires.

### **2.1.3. Réduction des émissions et de la pollution**

Le recyclage du polypropylène réduit les émissions de dioxyde de carbone et d'autres polluants résultant des opérations d'extraction et de fabrication de nouveaux plastiques. Par conséquent, il contribue à l'amélioration de la qualité de l'air et à la préservation de la santé de l'environnement.

### **2.1.4. Économie d'espace dans les décharges**

Au lieu de jeter les déchets plastiques dans les décharges, ils sont collectés et recyclés. Cela réduit la nécessité de créer davantage d'espace pour les décharges et contribue à la durabilité de l'utilisation des espaces terrestres [5].

## **2.2. Réduire le coût de production**

### **2.2.1. Réduction du coût des matières premières**

L'utilisation de matières recyclées dans la production de polypropylène réduit le besoin d'acheter de nouvelles matières premières. Ainsi, les entreprises et les usines peuvent économiser sur les coûts d'achat de nouvelles matières plastiques.

### **2.2.2. Économies d'énergie**

Le processus de recyclage du polypropylène consomme moins d'énergie que la production de nouvelles matières plastiques. Par conséquent, il est possible de réaliser des économies sur les coûts énergétiques liés au processus de fabrication.

### **2.2.3. Réduction du coût d'élimination des déchets**

Lorsque le polypropylène est recyclé plutôt que jeté dans des décharges ou incinéré, cela permet de réduire les coûts liés à l'élimination et à la gestion des déchets. Cela peut être bénéfique pour les entreprises et les autorités locales qui supportent les coûts liés à l'élimination des déchets [6].

#### **2.2.4. Valorisation économique des déchets**

Le recyclage du polypropylène permet de valoriser économiquement les déchets et de les transformer en nouveaux produits désirables. Cela contribue à générer un retour sur investissement en exploitant la valeur économique des déchets [7].

### **2.3. Création d'emplois**

#### **2.3.1. Opportunités d'emploi dans l'industrie du recyclage**

Le processus de recyclage du polypropylène nécessite des compétences spécialisées dans la collecte, le tri et la transformation des déchets plastiques. Ces opérations peuvent offrir des opportunités d'emploi directes dans les étapes de collecte, de tri et de transformation en produits recyclés.

#### **2.3.2. Opportunités d'emploi dans les secteurs du traitement et de la fabrication**

Le recyclage du polypropylène ouvre des portes à des opportunités d'emploi dans les secteurs du traitement et de la fabrication associés. Les travailleurs spécialisés dans le recyclage peuvent travailler dans des unités de recyclage et des usines de fabrication de produits finaux recyclés.

#### **2.3.3. Opportunités d'emploi dans la recherche et le développement**

De nombreux chercheurs et ingénieurs travaillent sur le développement de techniques et de processus plus efficaces pour le recyclage du polypropylène. Ces efforts offrent des opportunités d'emploi dans le domaine de la recherche et du développement, où l'exploration et l'amélioration des processus de recyclage ainsi que le développement de produits innovants à partir de polypropylène recyclé sont réalisés.

#### **2.3.4. Opportunités d'emploi dans les services logistiques**

La collecte et le transport des déchets plastiques recyclés nécessitent une logistique intégrée. Le transport et la distribution des déchets des sources vers les unités de recyclage sont organisés. Ces opérations peuvent offrir des opportunités d'emploi dans le domaine des services logistiques et du transport [8].

### **2.4. Promouvoir la durabilité**

Le recyclage du polypropylène contribue à renforcer la durabilité environnementale et économique. Voici quelques façons de promouvoir la durabilité de ce processus :

### **2.4.1. Réduction des émissions de carbone**

Le recyclage du polypropylène est considéré comme plus durable que la production du polymère d'origine. Le processus de production du polymère primaire consomme beaucoup d'énergie et génère d'importantes quantités de gaz à effet de serre. En revanche, le recyclage du polypropylène consomme moins d'énergie et réduit les émissions de carbone.

### **2.4.2. Conservation des ressources limitées**

Plutôt que de dépendre de l'utilisation de ressources primaires telles que le pétrole et le gaz naturel, le recyclage du polypropylène utilise des ressources recyclées, ce qui préserve les ressources naturelles limitées et réduit la dépendance à l'extraction de davantage de ressources.

### **2.4.3. Réduction des déchets**

Le recyclage du polypropylène contribue à réduire l'accumulation de déchets plastiques dans les décharges et les zones environnementales. Cela réduit la pollution environnementale, préserve la propreté de l'environnement et préserve la biodiversité.

### **2.4.4. Économie d'eau**

La production du polymère d'origine consomme de grandes quantités d'eau. Cependant, le processus de recyclage du polypropylène nécessite moins d'eau. Par conséquent, il contribue à économiser l'eau et à réduire son utilisation dans les opérations de production [9].

## **2.5. Stimuler l'innovation, la recherche et le développement**

Le recyclage du polypropylène stimule l'innovation, la recherche et le développement dans plusieurs aspects, notamment:

### **2.5.1. Développement de nouvelles technologies et procédés**

Le recyclage du polypropylène nécessite des technologies et des procédés avancés pour séparer et purifier les matières plastiques et les transformer en nouveaux produits. Cela encourage le développement et l'innovation dans le domaine de la technologie de recyclage, améliorant ainsi l'efficacité et la qualité des produits recyclés.

### **2.5.2. Développement de produits recyclés**

Le recyclage du polypropylène stimule la demande de produits recyclés tels que des sacs et des emballages plastiques recyclés. Cela favorise l'innovation dans la conception et le développement de nouveaux produits utilisant des matériaux recyclés, renforçant ainsi l'économie circulaire et offrant aux entreprises des opportunités de développer des produits innovants.

### **2.5.3. Recherche de meilleures solutions pour la gestion des déchets**

Le recyclage du polypropylène fait partie d'une approche globale de gestion des déchets. Cela nécessite la recherche de meilleures solutions pour améliorer les systèmes de collecte, de tri et d'orientation des déchets vers les opérations de recyclage. Cela encourage la recherche et le développement dans des domaines tels que la technologie de séparation des déchets et les améliorations des processus de recyclage.

### **2.5.4. Collaboration et partenariats**

Le recyclage du polypropylène nécessite la collaboration entre différentes entreprises et institutions, notamment les fabricants, les recycleurs, les centres de recherche et les universités. Cela favorise la collaboration et l'échange de connaissances, stimulant ainsi l'innovation et la recherche dans le domaine du recyclage [10].

## **2.6. Offre des opportunités d'emploi et stimule l'économie locale**

### **2.6.1. Industrie du recyclage**

L'industrie du recyclage représente une opportunité de créer de nouveaux emplois. Le processus de collecte, de tri et de transformation du polypropylène usagé en nouveaux produits nécessite des travailleurs qualifiés dans des domaines tels que les techniciens et les ouvriers spécialisés dans les techniques de fabrication plastique. L'exploitation et la gestion des centres de recyclage nécessitent également des compétences opérationnelles et des équipes pluridisciplinaires.

### **2.6.2. Secteurs connexes**

Une augmentation du recyclage peut entraîner le développement et la promotion d'autres secteurs connexes. Par exemple, la transformation du polypropylène usagé en nouveaux produits nécessite une technologie et des équipements de fabrication avancés. Cela encourage le développement et l'expansion du secteur de la technologie du traitement des plastiques et de la fabrication de produits plastiques recyclés.

### **2.6.3. Petites et moyennes entreprises**

Le recyclage peut offrir des opportunités aux petites et moyennes entreprises, où les start-ups et les entrepreneurs peuvent participer aux opérations de collecte, de tri et de transformation du polypropylène récupéré. Le soutien à ces projets contribue à l'économie locale et aide à créer des emplois locaux [11].



## 2.7. L'économie circulaire

Est un modèle économique visant à promouvoir la durabilité et à réduire la consommation non durable en transformant le système économique traditionnel linéaire en un système circulaire. L'économie circulaire repose sur trois concepts clés:

### 2.7.1. Conception de produits et de services à longue durée de vie et recyclables

Les produits sont conçus de manière à prolonger leur durée de vie et à faciliter leur réutilisation ou leur transformation en matières premières recyclables.

### 2.7.2. Récupération des ressources et recyclage

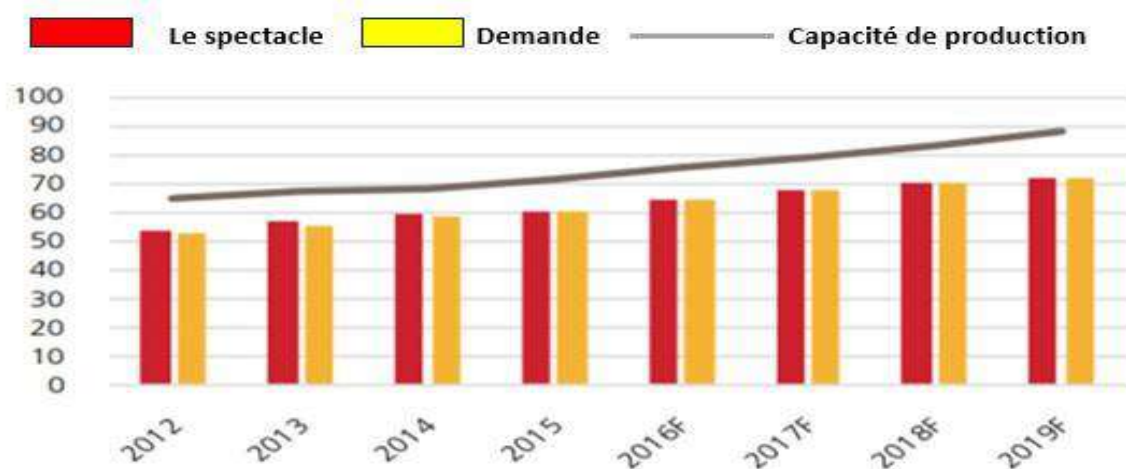
Les ressources consommées sont collectées et recyclées plutôt que d'être éliminées, ce qui permet de récupérer leur valeur économique et de réduire la pression sur les ressources naturelles.

### 2.7.3. Promotion des systèmes économiques locaux et de la collaboration entre les entreprises

L'économie circulaire encourage la collaboration entre les entreprises et favorise l'autonomie locale en créant des chaînes d'approvisionnement fermées, ce qui renforce l'équilibre économique et réduit la dépendance excessive aux ressources externes [12].

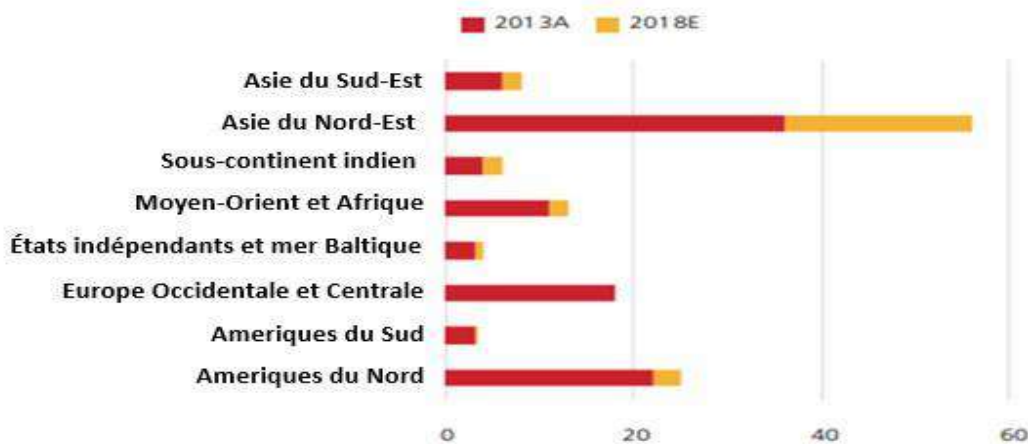
## 2.8. Offre et demande mondiales

L'offre et la demande mondiales de propylène sont deux éléments essentiels qui influencent les prix et les échanges de propylène à l'échelle mondiale. Le propylène est l'un des polymères plastiques les plus importants et est utilisé dans de nombreuses applications industrielles telles que la fabrication de fibres, de revêtements et d'emballages.



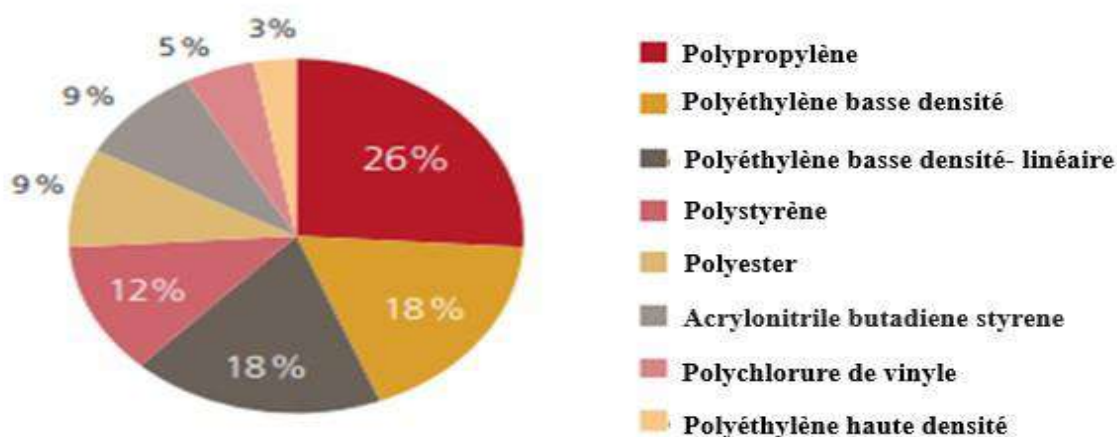
**Figure III.2 :** Offre et demande mondiales de polypropylène (millions de tonnes métriques) [13]

L'offre de propylène au niveau mondial est affectée par des facteurs tels que la production de pétrole et de gaz naturel et la technologie disponible pour convertir ces ressources primaires en propylène. L'offre est également influencée par des facteurs géographiques, politiques et économiques des pays producteurs et exportateurs de propylène.



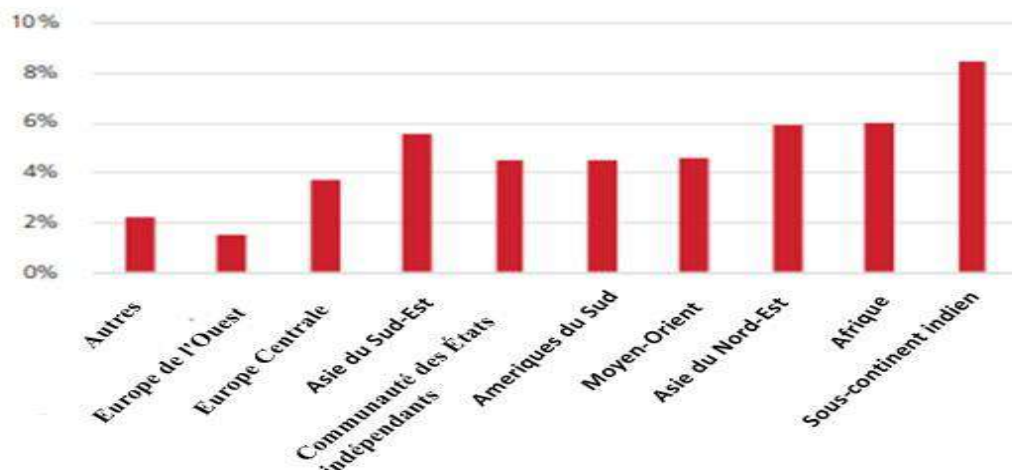
**Figure III.3 :** Augmentation de la capacité de production de propylène (millions de tonnes métriques) [13]

La demande de propylène dépend de la demande de produits plastiques et industriels qui utilisent le propylène comme matière première. La demande est influencée par des facteurs tels que la croissance économique, le développement technologique, les tendances de consommation et les fluctuations du marché mondial des plastiques et des industries connexes.



**Figure III.4 :** Polymères par produit 2014 [ 13]

Les prix du propylène varient en fonction de l'équilibre entre l'offre et la demande à l'échelle mondiale, ainsi que d'autres facteurs tels que les coûts de production, les ressources naturelles, les tarifs douaniers, les évolutions politiques et environnementales.



**Figure III.5 :** Taux de croissance annuel moyen de la demande de polypropylène [13]

## 2.9. Le prix du polypropylène

Le prix mondial du polypropylène était d'environ 945 dollars américains par tonne en 2020, ce qui représente une baisse d'environ 24 % par rapport à 2018. Cependant, le prix du polypropylène a augmenté jusqu'à 1315 dollars américains par tonne en juillet 2021. Actuellement, le prix du polypropylène est de 8 727 dollars américains à partir du 15 septembre 2021.

## 3. L'impact environnemental du processus de recyclage du polypropylène

### 3.1. Effets de la pollution plastique sur le polypropylène recycle

L'impact de la pollution plastique par le polypropylène recyclé devient de plus en plus apparent : altération des habitats et des voies naturelles, réduction de la résilience des écosystèmes au changement climatique et impact direct sur les moyens de subsistance, la capacité de production alimentaire et le bien-être environnemental et social de millions de personnes. La pollution plastique affecte de manière disproportionnée les groupes les plus vulnérables, affectant plus les femmes que les hommes.

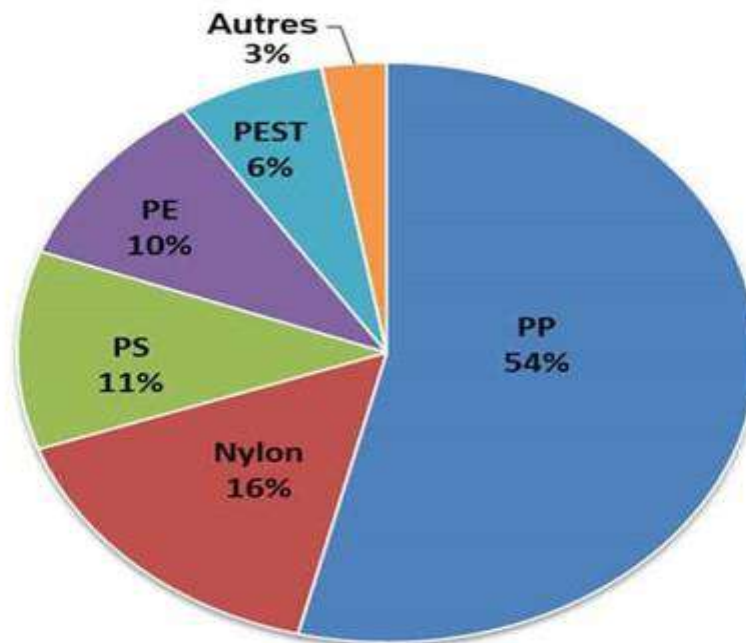
#### 3.1.1. Effets de la pollution plastique sur la santé humaine

La pollution plastique constitue une menace pour la santé humaine. À chaque étape de son cycle de vie, le plastique PP présente des risques pour la santé humaine en raison de l'exposition aux produits chimiques utilisés dans la production, aux granulés de plastique eux-mêmes et aux additifs [14]. Les particules de PP peuvent pénétrer dans le corps humain par ingestion et inhalation, ainsi que les nanoparticules qui peuvent pénétrer la peau [15]. On craint qu'il ne contienne des agents pathogènes, en particulier des microplastiques [16].

Des études récentes indiquent que les adultes américains dont le matériau en polypropylène est ingéré par les humains et la faune peuvent consommer plus de 50 000 morceaux de plastique

chaque année [17], augmentant le risque d'effets sur la santé. Une étude des microplastiques trouvés dans les poissons sauvages a montré que 65 % des 496 espèces de poissons examinées avaient du plastique dans leurs tripes [18].

L'exposition des consommateurs aux additifs chimiques peut également se produire dans les principales catégories de produits, y compris ceux fabriqués par le polypropylène entre en contact avec les aliments, les matériaux de construction, les appareils électroniques, les jouets, les soins personnels et les produits ménagers. Selon une étude menée en 2021, 25% des jouets pour enfants contiennent des produits chimiques nocifs. Environ 126 substances pouvant être nocives pour la santé des enfants ont été recensées, dont 31 plastifiants, 18 retardateurs de flamme et 8 épices [19]. Dans une autre étude, les chercheurs ont analysé 259 bouteilles d'eau en plastique (inutilisées) et ont découvert que 93 % d'entre elles étaient contaminées par des microplastiques (**Figure 6**) [20].



**Figure III.6 :** Pourcentage de particules de plastique dans l'eau en bouteille [20]

L'exposition professionnelle aux produits chimiques dangereux est élevée dans l'industrie des plastiques. Rapport de classement européen des risques professionnels, les industries du plastique, du caoutchouc et du textile sont des secteurs industriels associés à des taux d'exposition élevés aux produits chimiques dangereux présents dans les plastiques [21].

Il y a aussi de la pollution plastique dans l'air (**Figure 7**) [22]. La recherche montre également que l'impact du plastique sur la pollution atmosphérique et les risques potentiels pour la santé humaine liés à l'inhalation de plastique suscitent des inquiétudes. La combustion à l'air libre de matériaux en polypropylène peut entraîner la libération de produits chimiques toxiques

et de particules telles que les dioxines, les furanes, le mercure et les BPC [23]. Cela pose des risques importants, en particulier pour les 11 millions d'entrepreneurs informels qui travaillent en étroite collaboration avec les déchets [24].



**Figure III.7** : Le plastique émet des gaz significatives à chaque étape du cycle de vie [22]

Le plastique est également présent dans la poussière. La recherche montre que les textiles et les fibres sont la principale raison pour laquelle le plastique s'infiltré dans les poumons humains, la nourriture et l'environnement [25]. On estime qu'environ 6 kg des 20 kg de poussière générée par un ménage moyen chaque année sont constitués de microplastiques [26]. Entre 3 % et 7 % des particules dans l'air sont causées par l'usure des pneus [27].

Exposition aux perturbateurs endocriniens dans les plastiques et risques posés par ces matériaux les produits chimiques pour la santé humaine ont été associés à une gamme de maladies humaines, notamment le cancer, le diabète, les troubles de la reproduction, les troubles du développement neurologique et la suppression du système immunitaire [28].

De nombreux examens et études ont souligné la nécessité de poursuivre les recherches pour évaluer l'impact de la pollution plastique par le polypropylène recyclé (y comprises les microfibrilles et autres microplastiques) sur la santé humaine, et pour comprendre le transfert potentiel des microplastiques et des produits chimiques dangereux aux cultures et aux animaux [14].

### **3.1.2. Effets de la pollution plastique sur l'environnement**

La mauvaise gestion des déchets plastiques a pollué tout le milieu marin, des plages aux sédiments océaniques les plus profonds [29].

Les plastiques représentent au moins 85 % de tous les déchets marins. Au fur et à mesure que le plastique se dégrade dans le milieu marin, il transfère les microplastiques, les microfibres synthétiques et la cellulose produits chimiques, métaux et micropolluants dangereux dans l'eau et les sédiments et finalement dans la chaîne alimentaire marine [30].

Les déchets plastiques ont des effets létaux et sublétaux sur la vie marine. Leurs effets comprennent l'enchevêtrement, la famine, la noyade et la rupture des tissus internes, la suffocation, l'hypoxie et le manque de lumière, le stress physiologique et les dommages toxiques [30].

Les microplastiques peuvent agir comme porteurs d'agents pathogènes. En cas d'ingestion, les particules peuvent amener les microplastiques à provoquer des changements dans l'expression des gènes et des protéines, une inflammation, des troubles du comportement alimentaire, un ralentissement de la croissance, des changements dans le développement du cerveau et une réduction des taux de filtration et de respiration.

Elle peut également altérer le succès reproducteur et la survie des organismes marins et nuire à la capacité des espèces clés et des « ingénieurs » environnementaux à construire des récifs coralliens ou à bioturber les sédiments [30].

La pollution plastique peut modifier le cycle mondial du carbone en affectant le plancton et la production primaire dans les systèmes marins d'eau douce et sauvages. Par exemple, les microplastiques PP peuvent affecter la photosynthèse et la croissance du phytoplancton, avoir des effets toxiques sur le développement et la reproduction du zooplancton, et affecter les pompes biologiques marines et les stocks de carbone océanique [31].

Sur l'ensemble de son cycle de vie, le polypropylène contribue au changement climatique. En 2015, les plastiques étaient responsables de 1,7 milliard de tonnes d'émissions de gaz à effet de serre, soit 3,4 % des émissions mondiales. Environ 90 % de ces émissions sont le résultat de la production de plastique et de la conversion des combustibles fossiles. Les émissions des plastiques tout au long du cycle de vie pourraient quadrupler pour atteindre 15 % du budget carbone mondial d'ici 2050 [32], rendant l'objectif de 1,5 °C pratiquement hors de portée, de plus, les microplastiques de polypropylène dans l'air ont entraîné un forçage radioactif net positif [33].

Les propriétés d'absorption de la lumière des microplastiques pourraient accélérer le réchauffement en réduisant l'albédo de surface de la glace et de la neige [34].

La fabrication de plastique a un impact sur la couche d'ozone et le climat en raison de l'utilisation de SAO et de HFC comme matières premières. De nombreuses substances

appauvrissant la couche d'ozone et des hydrofluorocarbures contrôlés en vertu du Protocole de Montréal sont utilisés comme matières premières pour la fabrication de produits en plastique.

Les utilisations de ces substances comme matières premières sont exemptées de l'élimination progressive en vertu du Protocole de Montréal, car les émissions provenant des matières premières sont négligeables. Cependant, des fuites se produisent, avec des effets néfastes sur la couche d'ozone et le climat [35].

Peu d'études ont étudié l'impact des déchets plastiques sur les écosystèmes du sol, mais cela pourrait être important [36]. A été observé pour s'accumuler les résidus de plastique dans les sols agricoles peuvent affecter négativement les propriétés physicochimiques associées à des sols sains et peuvent menacer la production alimentaire à long terme [37].

La présence de plastique peut modifier considérablement l'écologie des écosystèmes marins et terrestres. Les changements environnementaux et les impacts biologiques de l'évolution de la diversité ont des conséquences sociales secondaires étendues et imprévisibles et peuvent affaiblir la résilience des écosystèmes [38]. Les plastiques peuvent agir en synergie avec d'autres facteurs de stress environnementaux, tels que les changements de température des océans, l'acidification des océans et la surexploitation des ressources océaniques, pour produire des effets cumulatifs plus importants et plus dommageables [39].

### **3.1.3. Les effets sociaux et économiques de la pollution plastique**

Les sociétés sont susceptibles de subir des impacts sociaux différents, les effets de l'exposition et de la gestion de la pollution plastique affectant les femmes les plus pauvres des zones urbaines et rurales [29]. Bien que les travailleurs dans des environnements informels et collaboratifs collectent, trient et recyclent le plastique, ils reçoivent de bas salaires et des conditions de travail dangereuses [40].

Certes, aborder la question de la pollution plastique nécessitera de réfléchir aux effets qu'elle a sur différentes cultures. D'autres opportunités seront également disponibles. La valeur totale du plastique est gaspillée par l'économie lorsqu'il est simplement jeté en tant que déchet... en raison de la nature intrinsèquement linéaire du système plastique (prendre-faire-jeter), 95 % de la valeur totale des emballages en plastique (80 à 120 milliards de dollars par an) est gaspillé dans l'économie après une seule utilisation [41]. De plus, d'ici 2040, on s'attend à ce que les entreprises aient 100 milliards de dollars de risque financier annuel qui leur sont associés si les gouvernements veulent payer pour le volume prévu de gestion et de recyclage des déchets. L'acquisition et la gestion des déchets plastiques sont considérées comme l'une des responsabilités les plus coûteuses des gouvernements.

Et les déchets plastiques augmentent le fardeau sur la santé humaine et l'environnement. Le fardeau social et économique des effets sur la santé associés aux perturbateurs endocriniens est estimé entre 4,6 et 288 milliards d'euros par an [42]. En raison de la difficulté d'évaluer les dommages causés aux services écosystémiques, il a été suggéré qu'une réduction de 1 % de la fourniture de services écosystémiques marins équivaut à une perte de 500 milliards de dollars américains par an de la valeur des avantages des marins pour les services écosystémiques [39].

Investir dans la prévention des déchets et des pollutions à la source coûte moins cher que de les traiter [43]. Les estimations du coût économique mondial de la pollution plastique marine pour le tourisme, la pêche et l'aquaculture, et d'autres coûts associés au nettoyage variaient de 6 milliards de dollars à 19 milliards de dollars ou plus en 2018 [30].

La pollution plastique est également préoccupante pour les droits de l'homme. Enfin, la pollution plastique par le polypropylène peut violer les droits de l'homme et exacerber les problèmes environnementaux existants [30].

#### 4. Conclusion

L'impact économique du recyclage du polypropylène montre une grande importance dans l'économie durable. Au lieu de dépendre de nouvelles ressources et de la production primaire, le recyclage du polypropylène peut être utilisé pour réduire les coûts et augmenter la rentabilité des entreprises. Les entreprises peuvent améliorer leur efficacité économique en réduisant les coûts liés à l'utilisation de nouvelles ressources et en améliorant la marge bénéficiaire.

Et pourtant, au vu de leurs difficultés de recyclage, les plastiques finissent par quitter le cycle industriel, sous forme d'émissions de gaz à effet de serre (incinération) ou solide (déchets), pour ensuite se fragmenter.

De plus, le recyclage du polypropylène contribue à réduire la pression sur les ressources naturelles et l'environnement en permettant la réutilisation des matériaux consommés et leur transformation en matières premières recyclables. Cela contribue à la préservation des ressources naturelles et à la réduction de la pollution résultant de la fabrication de nouveaux produits.

En général, on peut dire que le recyclage du polypropylène a un impact économique positif en améliorant l'efficacité économique, en renforçant la durabilité financière des entreprises, ainsi qu'en préservant les ressources naturelles et l'environnement. Il est important de renforcer et d'étendre les efforts de recyclage du polypropylène afin de réaliser des avantages plus importants sur les plans économique et environnemental.



## 5. Références

- [1]. Champion, N., Thiel, C.L., Woods, N.C., Swanzy, L., Landis, A.E., Bilec, M.M., 2015. Sustainable healthcare and environmental life-cycle impacts of disposable supplies : a focus on disposable custom packs. *J. Clean. Prod.* 94, 46e55.
- [2]. Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L., 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3 (7), 25-29. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
- [3]. Mankiw, N. Gregory. *Principles of economics*. Cengage Learning, 2014.
- [4]. Bašić, Jasmina, Ljiljana Jovčić, and Lazar Janić. "THE CIRCULAR ECONOMY HANDBOOK, REALIZING THE CIRCULAR ADVANTAGE, BY PETER LACY, JESSICA LONG, WESLEY SPINDLER, A BOOK REVIEW." *Економика пољопривреде* 67.2 (2020): 601-608.
- [5]. Reinales, Diana, David Zambrana-Vasquez, and Aitana Saez-De-Guinoa. "Social life cycle assessment of product value chains under a circular economy approach: a case study in the plastic packaging sector." *Sustainability* 12.16 (2020): 6671.
- [6]. Barrowclough, Diana, and Carolyn Deere Birkbeck. "Transforming the global plastics economy: the role of economic policies in the global governance of plastic pollution." *Social Sciences* 11.1 (2022): 26.
- [7]. Kore, Rajkumar, Anand D. Sawant, and Robin D. Rogers. "Recyclable Magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticle-Supported Chloroaluminate Ionic Liquids for Heterogeneous Lewis Acid Catalysis." *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 9.26 (2021): 8797-8802.
- [8]. Karian, Harutun, ed. *Handbook of polypropylene and polypropylene composites*, revised and expanded. CRC press, 2003.
- [9]. Zabaniotou, Anastasia, and Ioannis Vaskalis. "Economic Assessment of Polypropylene Waste (PP) Pyrolysis in Circular Economy and Industrial Symbiosis." *Energies* 16.2 (2023): 593.
- [10]. Subramanian, P. M. "Plastics recycling and waste management in the US." *Resources, Conservation and Recycling* 28.3-4 (2000): 253-263.
- [11]. Shen, Li, and Ernst Worrell. "Plastic recycling." *Handbook of recycling*. Elsevier, 2014. 179-190.
- [12] مطاوع. "الاقتصاد الدائرى بين النظرية والتطبيق دراسة حالة للاقتصاد المصري." مجلة البكل, احمد, احمد, 160-194 :الدراسات السياسية والاقتصادية 3.1 (2023).
- [13] 11may 2016 القوائم المالية للشركة، تقديرات أبحاث البلاد المالية، الشركة المتقدمة للبتر وكيمائيات  
(<http://argaamplus.s3.amazonaws.com/e6414622-8ffb-4196-93b6-81944334b7ac.pdf>)  
consulté le 16/05/2023 á 14h 30 min
- [14]. Centre for International Environmental Law, *Plastic and Health: The Hidden Costs of a Plastic Planet* (2019).
- [15]. Andre Vethaak and Juliette Legler, "Microplastics and human health: knowledge gaps should be addressed to ascertain the health risks of microplastics", *Science*, vol. 371, no. 6530 (Feb. 2021), pp. 672–67.
- [16]. Valentin Foulon and others, "Colonization of polystyrene microparticles by *Vibrio crassostreae*: light and electron microscopic investigation", *Environmental Science and Technology*, vol. 50, no. 20 (Oct. 2016) pp. 10988–10996.

- [17]. Kieran D. Cox and others, “Hidden Consumption of Microplastics”, *Environmental Science and Technology*, vol. 53, no. 12 (June 2019), pp. 7068–7074.
- [18]. Ana Markic and others, “Plastic ingestion by marine fish in the wild”, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 50, no. 7 (July 2019), pp. 657–697.
- [19]. Nicolo Aurisano and others, “Chemicals of concern in plastic toys”, *Environment International*, vol. 146 (Jan 2021).
- [20]. Mason, S. A. et co. (2018) “Synthetic Polymer Contamination in Bottled Water.” *Frontiers in chemistry* vol. 6 407. doi:10.3389/fchem.2018.00407.
- [21]. D. Montano, “Chemical and biological work-related risks across occupations in Europe: a review”, *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, vol. 9, article 28 (July 2014).
- [22]. <https://media.wwf.no/assets/attachments/Plastics-the-cost-to-society-the-environment-and-the-economy-WWF-report.pdf> consulté le 20/05/2023 à 22h 10 min
- [23]. K. S. Verma and others, “Toxic Pollutants from Plastic Waste – A Review”, *Procedia Environmental Sciences*, vol. 35 (2016), pp. 701–708.
- [24]. C. Velis and E. Cook, “Mismanagement of Plastic Waste through Open Burning with Emphasis on the Global South: A Systematic Review of Risks to Occupational and Public Health”, *Environmental Science and Technology*, vol. 55, no. 11 (June 2021), pp. 7186–7207.
- [25]. Austine Ofondu Chinomso Iroegbu and others, “Plastic Pollution: A Perspective on Matters Arising: Challenges and Opportunities”, *ACS Omega*, vol. 6, no. 30 (July 2021), pp. 19343–19355.
- [26]. R. Dris and others, “A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments”, *Environmental Pollution*, vol. 221 (Feb. 2017), pp. 453–458.
- [27]. P. J. Kole and others, “Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 14, no. 10 (Oct. 2017).
- [28]. Jodi Flaws and others, *Plastics, EDCs and health: A guide for public interest organizations and policy-makers on endocrine disrupting chemicals & plastics* (Washington, Endocrine Society, 2020).
- [29]. UNEP, *Drowning in Plastics: Marine Litter and Plastic Waste Vital Graphics* (Nairobi, 2021).
- [30]. UNEP, *From Pollution to Solution: A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution* (Nairobi, 2021).
- [31]. Maocai Shen and others, “(Micro) plastic crisis: un-ignorable contribution to global greenhouse gas emissions and climate change”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 254, article 120138 (May 2020).
- [32]. Jiajia Zheng and Sangwon Suh, “Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics”, *Nature Climate Change*, vol. 9 (April 2019), pp. 374–378.
- [33]. L. E. Revell and others, “Direct radiative effects of airborne microplastics”, *Nature*, vol. 598 (Oct. 2021), pp. 462–467.
- [34]. Yu-Lan Zhang, Shi-Chang Kang and Tan-Guang Gao, “Microplastics have light-absorbing ability to enhance cryospheric melting”, *Advances in Climate Change Research*, vol. 13, no. 4 (June 2022), pp. 455–458.

- [35]. Stephen O. Andersen and others, “Narrowing feedstock exemptions under the Montreal Protocol has multiple environmental benefits”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118, no. 49 (Nov. 2021).
- [36]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, *Assessment of Agricultural Plastics and Their Sustainability: A Call for Action* (Rome, 2021)..
- [37]. Dan Zhang and others, “Plastic pollution in croplands threatens long-term food security”, *Global Change Biology*, vol. 26, no. 6 (June 2020), pp. 3356–3367.
- [38]. Boris Worm and others, “Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services”, *Science*, vol. 314, no. 5800 (Nov. 2006), pp. 787–790.
- [39]. Nicola J. Beaumont and others, “Global ecological, social and economic impacts of marine plastic”, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 142 (May 2019), pp. 189–195.
- [40]. J. Nikiema and Z. Asiedu, “A review of the cost and effectiveness of solutions to address plastic pollution”, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29 (Jan. 2022), pp. 24547–24573.
- [41]. The Pew Charitable Trusts and SYSTEMIQ, *Breaking the Plastic Wave: A Comprehensive Assessment of Pathways towards Stopping Ocean Plastic Pollution: Summary* (Report 2020).
- [42]. I. Rijk, M. van Duursen and M. van den Berg, *Health Costs That May Be Associated with Endocrine Disrupting Chemicals: An Inventory, Evaluation and Way Forward to Assess the Potential Socio-Economic Impact of EDC--Associated Health Effects in the EU* (Utrecht, Institute for Risk Assessment Sciences, 2016).
- [43]. UNEP, *Mapping of Global Plastics Value chain and Plastics Losses to the Environment: With a Particular Focus on Marine Environment* (Nairobi, 2018).

---

# Conclusion Générale

---

## Conclusion générale

Le polypropylène est largement utilisé dans l'industrie de l'emballage et des profilés en raison de ses excellentes propriétés mécaniques et de sa légèreté. Cependant, sa forte présence dans les décharges en fait un candidat idéal pour le recyclage. Le recyclage mécanique est considéré comme la meilleure solution pour éliminer les déchets de polypropylène, offrant des avantages environnementaux et économiques tels que la réduction de la pollution et la réutilisation des matériaux consommés. Le recyclage du polypropylène a un impact économique positif en réduisant les coûts et en améliorant la rentabilité des entreprises, tout en préservant les ressources naturelles et en réduisant la pollution. Il est donc crucial de renforcer et d'étendre les efforts de recyclage du polypropylène pour obtenir des avantages plus importants sur les plans économique et environnemental.

Pour surmonter les défis et les obstacles auxquels est confrontée l'industrie du recyclage du polypropylène, les solutions proposées suivantes peuvent être adoptées : le développement de la technologie (il convient de renforcer la recherche et le développement pour développer des techniques de recyclage du polypropylène plus efficaces et économiques. Des technologies avancées telles que l'analyse biologique et chimique et les nouvelles techniques de séparation peuvent être utilisées pour améliorer l'efficacité des processus de recyclage et réduire les coûts associés), la collaboration industrielle (il est important de renforcer la collaboration entre les fabricants, les recycleurs, et d'autres parties prenantes telles que les gouvernements, les ONG et les institutions de recherche. La collaboration dans le partage des connaissances, de l'expertise et des ressources peut améliorer les processus de recyclage et faciliter le développement de solutions innovantes), la promotion de politiques et de législations favorables (les gouvernements et les organismes de réglementation doivent prendre des mesures fortes pour promouvoir le recyclage du polypropylène. Ces mesures peuvent inclure la promotion de l'investissement dans les installations de recyclage, la fourniture d'incitations financières et fiscales aux entreprises engagées dans la durabilité, et l'imposition d'exigences strictes pour augmenter le taux de recyclage et réduire l'utilisation de nouveaux plastiques), la sensibilisation du public et l'éducation (le public doit être conscient de l'importance du recyclage du polypropylène et de son impact positif sur l'environnement et l'économie).