

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de
L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 20 août 1955 - SKIKDA

Faculté de Technologie

Département de Pétrochimie



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Filière : Industries Pétrochimiques

Spécialité : Génie Pétrochimique

Thème :

**Valorisation chimique des déchets plastiques avec
la pyrolyse**

Réalisé par : Mme. **MOUATS** Aya

Mme. **SALAH** Wissal

Encadreur : Dr. S. **BOULAHNECH**

Dr. C. **SAADI**

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Dr. C. Saadi et Dr. S. Boulahnech, nos encadreurs, pour leur accompagnement constant tout au long de ce travail. Leur disponibilité, leurs conseils avisés ainsi que leurs orientations méthodologiques ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également les membres du jury, Dr. Mechati, pour avoir accepté d'évaluer ce travail, et pour leurs remarques constructives et enrichissantes qui ont grandement contribué à l'amélioration de ce projet.

Une reconnaissance particulière va à Marouani Anes pour son travail remarquable dans la conception et la réalisation du réacteur. Grâce à sa rigueur, son savoir-faire et son engagement, il a su concrétiser avec précision et professionnalisme notre idée initiale. Son implication a permis de transformer notre vision en une réalité fonctionnelle, allant même au-delà de nos attentes.

Je souhaite également remercier chaleureusement Ahmed Boudiba et Yahia, qui ont pris en charge l'obtention et l'analyse des résultats. Leur sérieux, leur méthode et leur implication ont été d'une grande aide pour la validation de notre travail expérimental.

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à l'ensemble de l'équipe pédagogique de la Faculté de technologie, département de pétrochimie à l'Université 20 Août 1955 – Skikda, pour la qualité de l'enseignement et le cadre propice à l'apprentissage et à la recherche.

Dédicace

Louange et remerciements à Dieu pour son aide dans l'achèvement de ce travail, sans la bénédiction duquel je ne l'aurais pas terminé.

Je voudrais dédier ce travail à :

Aux étudiants de Gaza qui ont été martyrisés et n'ont pas pu obtenir leurs diplômes, et dont les rêves restent suspendus entre les murs détruits et les décombres des universités et des écoles,

À mon père et à ma mère, sans leur soutien, leur présence à mes côtés, leur fatigue, leur travail acharné et leur travail de tous les jours, je ne serais pas qui je suis aujourd'hui,

À mes sœurs et mes frères Hadjar, Rym, Aymen et Youssef,

À mon collègue qui a travaillé sur cette thèse, qui a été le meilleur compagnon et qui m'a soutenu et aidé à terminer ce travail avec toute la gentillesse et la patience,

Enfin, à ceux qui ont été la raison pour laquelle ma vie a changé pour le mieux, qui m'ont fait voir la vie sous un angle différent, ce qui ont toujours été avec moi dans ma joie et ma tristesse, mes âmes, ma Lamia et ma Nada.

Aya

Dédicace

Je rends grâce à Allah, qui m'a accordé la réussite pour achever ce parcours. Sans Son aide et Sa bénédiction, je n'aurais jamais pu arriver là où je suis aujourd'hui.

Louange à Lui, en tout temps et en toute circonstance.

Je voudrais dédier ce travail à :

À tous les étudiants de Gaza,

À ceux dont les rêves ont été brisés par la guerre, à ceux qui n'ont pas eu la chance de poursuivre leur parcours, à ceux qui sont tombés en martyrs sous les bombes, et

à ceux qui luttent encore dans l'ombre, entre ruines et silence. Cette modeste œuvre vous est dédiée, en hommage à votre courage, à votre dignité et à votre droit bafoué de rêver.

À ma mère,

Ton amour est un refuge, ton regard une source de paix. Tu es le cœur de ma vie, celle qui prie pour moi en silence, qui se tient debout quand je vacille. Sans toi, rien de cela n'aurait eu de sens. Je te dois bien plus que des mots.

À mon père,

Tu es ma force tranquille, le roc sur lequel j'ai construit mes pas. Ton sacrifice, ta sagesse et ta foi en moi sont les racines de ce que je suis devenu. Ce travail porte ton empreinte.

À mon frère Akram et à ma sœur Takwa,

Vous êtes bien plus que des membres de ma famille, vous êtes mes compagnons de route, mes confidents et mes rires partagés. Dans les moments de fatigue, votre présence a allégé mes jours. Merci d'être là, simplement.

Wissal

Résumé

Ce mémorandum vise à aborder la question du recyclage des déchets plastiques afin d'apporter une solution écologiquement et économiquement viable au problème de pollution résultant de leur accumulation. La pollution par diverses matières plastiques cause de nombreux dommages à tous les écosystèmes et à leurs composantes.

Parmi ces matières plastiques figurent : les déchets et ordures issus des activités humaines et domestiques déversés dans les plans d'eau, les particules de microplastique rejetées dans les océans, ainsi que les filets de pêche en plastique, entre autres. L'objectif de ce mémorandum est de contribuer à sensibiliser à l'importance du recyclage des plastiques en utilisant des méthodes efficaces et durables et d'encourager des solutions technologiques alternatives pour réduire les impacts négatifs des déchets plastiques sur l'environnement.

Abstract

This memorandum aims to address the issue of plastic waste recycling in order to provide an ecologically and economically viable solution to the pollution problem resulting from their accumulation. Pollution from various plastic materials causes significant damage to all ecosystems and their components. These plastic materials include: waste and garbage from human and domestic activities dumped into water bodies, microplastic particles released into the oceans, as well as plastic fishing nets, among others. The objective of this memorandum is to contribute to raising awareness of the importance of plastic recycling using efficient and sustainable methods and to encourage alternative technological solutions to reduce the negative impacts of plastic waste on the environment.

ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى معالجة قضية إعادة تدوير النفايات البلاستيكية، بهدف إيجاد حل بيئي واقتصادي مجدي بيئيًا واقتصاديًا لمشكلة التلوث الناتجة عن تراكمها. يلحق التلوث الناتج عن مختلف المواد البلاستيكية أضرارًا جسيمة بجميع النظم البيئية ومكوناتها. وتشمل هذه المواد البلاستيكية: النفايات والقمامة الناتجة عن الأنشطة البشرية والمنزلية التي تُلقى في المسطحات المائية، وجسيمات البلاستيك الدقيقة المُنقاة في المحيطات، بالإضافة إلى شبكات الصيد البلاستيكية، وغيرها. وتهدف هذه المذكرة إلى المساهمة في رفع مستوى الوعي بأهمية إعادة تدوير البلاستيك باستخدام أساليب فعالة ومستدامة، وتشجيع الحلول التكنولوجية البديلة للحد من الآثار السلبية للنفايات البلاستيكية على البيئة.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Quelques types de polymères.....	11
Tableau II.1 : Valorisation des déchets de polymères par voie chimique.....	35
Tableau III.1 : Résultats de la chromatographie des deux échantillons.....	49
Tableau III.2 : distribution des aromatiques contenus dans les liquides de pyrolyse.....	56
Tableau III.3 : Résultats de la pyrolyse de PET.....	57

Liste des Figures

Figure I .1:	Molécules de polymères	4
Figure I .2:	Représentation de la chaine d'un polymère linéaire	6
Figure I .3:	Représentation schématique d'un polymère Bidimensionnel : le carbone Graphite.....	7
Figure I .4:	Représentation schématique d'un polymère Tridimensionnel	7
Figure I .5:	représentation schématique d'un polymère thermoplastique	8
Figure I .6:	L'effet des déchets plastique rejeté dans la nature sur les animaux marins et les arbres	14
Figure I .7:	Schéma simplifié des étapes du recyclage mécanique	16
Figure I .8:	Le recyclage mécanique des plastiques	17
Figure I .9:	Recyclage mécanique et chimique	18
Figure II.1 :	Illustration du réacteur batch avec un agitateur adaptée.....	26
Figure II.2 :	Schéma de pyrolyseur à deux étapes.....	27
Figure II.3 :	Schéma d'un système de pyrolyse catalytique formé d'un réacteur à lit fluidisé.....	28
Figure II.4 :	Schéma de principe du réacteur CSBR adapté.....	30
Figure II.5 :	Schéma du réacteur de four à vis adapté.....	31
Figure II.6 :	Distribution du nombre de carbone du liquide dérivé de la pyrolyse.....	33
Figure II.7 :	Distribution du nombre de carbone du liquide dérivé de la pyrolyse catalytique et non- catalytique du PE.....	34
Figure II.8 :	Pyrolyseur de plastique.....	38
Figure II.9 :	les déchets plastiques.....	38
Figure II.10 :	Pyrolyseur de plastique.....	39
Figure II.11 :	Pyrolyseur de plastique.....	39
Figure II.12 :	Les résultats.....	40
Figure III.1:	Le réacteur.....	43

Figure III.2 :	bouteille de gaz + poêle thermique.....	44
Figure III.3 :	Condenseur.....	44
Figure III.4 :	Erlenmeyer.....	45
Figure III.5 :	Baudruche.....	45
Figure III.6 :	Valve de sécurité.....	46
Figure III.7 :	Déchets plastique.....	46
Figure III.8 :	Schéma de l'expérience de recyclage du plastique.....	47
Figure III.9 :	Déchets de plastique déchetés.....	47
Figure III.10 :	pyrolyseur de plastique.....	48
Figure III.11 :	Schéma simplifié des composants de la CPG.....	49
Figure III.12 :	Points d'éclair.....	50
Figure III.13 :	Point d'aniline.....	51
Figure III.14 :	Le viscosimètre.....	51
Figure III.15 :	Le gaz produit de la pyrolyse.....	52
Figure III.16 :	Le liquide récupéré de la pyrolyse.....	55
Figure III.17 :	Distribution de nombre de carbone des liquides dérivés de la pyrolyse non catalytique.....	55

Figure III. 18 : Distribution des aromatiques contenus dans le liquide de pyrolyse.....56

Table des atières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Les polymères et les déchets plastiques.....	4
I.1. Introduction	4
I.2. Définition de polymère.....	4
I.2.1 Monomères.....	4
I.2.2 Polymères.....	4
I.3. Classification des polymères.....	5
I.3.1. Classification selon leur nature chimique.....	5
I.3.2. Classification selon leur origine.....	5
I.3.3. Selon leur domaine d'applications.....	5
I.3.4. Selon leur structure des chaines (dimensionnalité).....	6
I.3.5. Selon leur comportement thermique.....	7
I.3.5.1. Thermoplastiques.....	8
I.3.5.2. Les thermodurcissables.....	8
I.6.2. La polymérisation en chaîne.....	13
I.7. Les déchets plastiques.....	13
I.8. L'impact des déchets plastiques.....	14
I.8.1. L'impact sur l'environnement.....	14
I.8.2. L'impact sur la santé.....	15
I.9. Valorisation des déchets plastiques.....	15
I.9.1. Valorisation mécanique.....	15
I.9.2. Valorisation thermique.....	17
I.11. Avantages potentiels de la pyrolyse des plastiques en huile.....	20
I.12. Limites et Contraintes Actuelles.....	21
I.13. Conclusion.....	21
Chapitre II : Généralités sur la pyrolyse.....	23
II.1. Introduction.....	23
II.2. Définition et principe de la pyrolyse du plastique.....	23
II.3. Les types de la pyrolyse.....	24
II.3.1. Pyrolyse lente (ou conventionnelle).....	24
II.3.2. Pyrolyse rapide.....	24

II.4. Les conditions influençant la pyrolyse	24
II.4.1. La température	24
II.4.2. Temps de séjour.....	25
II.4.3. Type de réacteur	26
II.4.4. L'absence ou la présence du catalyseur	32
II.4.5. La nature de la charge	34
II.5. Le Meilleur Type De Plastique Pour La Pyrolyse.....	35
II.5.1. Aptitude des plastiques à la pyrolyse.....	36
II.5.2. Rendement de l'huile liquide	36
II.5.3. Types de déchets plastiques adaptés à la pyrolyse.....	36
II.6.1. Matériaux	37
II.6.2. Outils.....	37
II.6.3. Les Étapes	38
II.7. Les Principaux Produits De La Pyrolyse.....	40
II.7.1. Résidus solides (charbon ou coke).....	40
II.7.2. Produits liquides (huile de pyrolyse ou goudron).....	41
II.7.3. Gaz non condensables (Syngas).....	41
II.8. Conclusion	42
Chapitre III : Partie pratique	43
III.1. Objectif de l'expérience	43
III.2. Matériaux et équipements utilisés	43
III.3. Schéma du montage expérimental	47
III.4. Préparation des échantillons.....	47
III.5. Protocole expérimental de la pyrolyse.....	48
III.6. Sécurité et précautions	49
III.8. Résultats et discussions	52
III.8.1. Le gaz de la pyrolyse.....	52
III.8.2 Le liquide de la pyrolyse.....	54
Conclusion générale.....	58
Les références.....	59

Introduction générale

Introduction générale

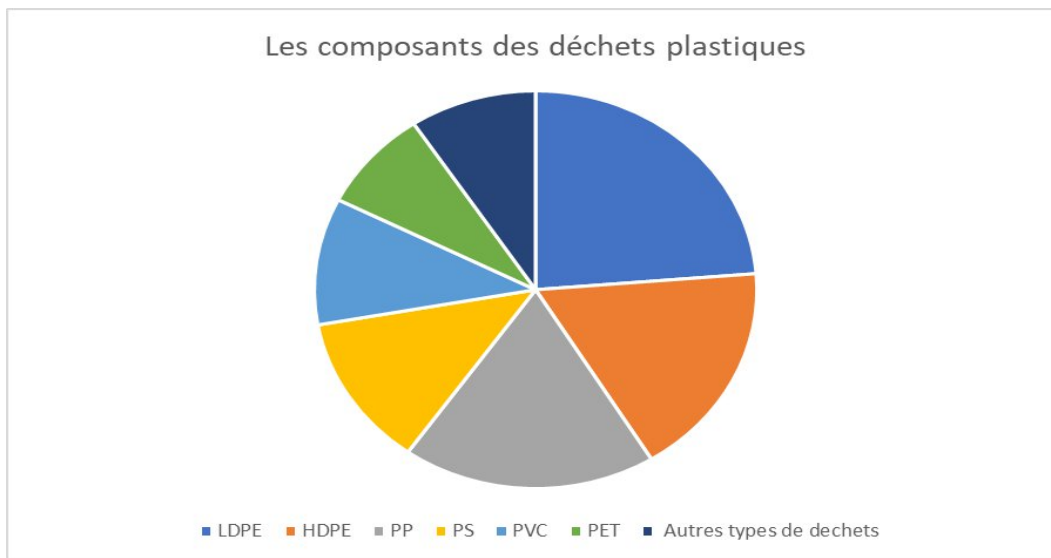
Actuellement, les produits polymères sont largement utilisés dans presque tous les domaines, en particulier dans les domaines de l'emballage, l'automobile, l'électricité, la construction, l'électronique, l'agriculture et d'autres industries. Ils sont devenus une partie inséparable et intégrale de notre vie, la quantité de plastiques consommés annuellement s'est développée considérablement pour leurs innombrables propriétés. La légèreté, la résistance, la conception facile, la durabilité, et son coût bas sont les facteurs d'une telle croissance phénoménale de leurs utilisations. Selon un rapport de l'agence américaine de l'environnement de l'année 2003, 80% des déchets plastiques sont envoyés à l'enfouissement, 8% sont incinérés et seulement 7% sont recyclés [1]. La production mondiale de plastique en 2012 aurait atteint 288 millions de tonnes [1]. Plus de la moitié de cette quantité a été utilisée pour des produits de consommation jetables, ce qui a contribué à la production de déchets en matières plastiques.

Subramanian a signalé que les plastiques représentent un faible taux de quantité des déchets mais qui est très significative. Dans notre pays, la production de déchets ménagers est estimée à 9 millions de tonnes par an. Ce chiffre est en constante augmentation. Les estimations chiffrées font état de 0,8kg/habitant/jour et ont atteint 1 kg/habitant/jour pour l'agglomération de grandes villes. En Algérie et partout dans le monde, l'utilisation de produits emballés a induit une augmentation des déchets de matières plastiques et une difficulté de leur enfouissement ou retrait [1].

La majorité des types de plastiques ne sont pas biodégradables et sont chimiquement non réactifs dans l'environnement. Certains d'entre eux tels que le polychlorure de vinyle (PVC) et le polycarbonate (PC) peuvent libérer lentement des composés toxiques. Zhou et al.[2] Papong et al.[3] Badia et al.[4] Ont révélé que des milliers d'années sont nécessaires pour la biodégradation des plastiques [5]. Cela entraîne l'accumulation des milliers en déchets plastiques et provoque des graves problèmes environnementaux dus à leur mise en décharge et leur enfouissement illégal ou leur incinération. Par conséquent, et universellement un embarras environnemental sérieux. La production du plastique comprend également l'utilisation des produits chimiques potentiellement nocifs, qui sont ajoutés comme stabilisateurs ou colorants et /ou renforts. Beaucoup d'entre eux n'ont pas subi une évaluation de

leurs risques sur la santé humaine et l'environnement, actuellement incertain. A titre d'exemple les phtalates, qui sont employés dans la production de PVC.

Le plus grand composant de ces déchets plastiques est le polyéthylène à basse densité à environ 23% (PEBD), suivi de 17,3% du polyéthylène à haute densité (PEHD), 18,5% de polypropylène (PP), 12,3% du polystyrène (PS), 10,7% du polychlorure de vinyle (PVC), 8,5% polyéthylène téréphtalate (PET) et 9,7% d'autres types de déchets [5].



Dans le but de la réduction de ce déchet plastique, on pense à leur valorisation par la réutilisation en les recyclant et parmi ces méthodes leur valorisation en hydrocarbure primaire donc c'est le cas de la pyrolyse. (Petit définition de la pyrolyse et un exemple avec les produits et les conditions études précédente 2 ou 3 avec les références avec leurs résultats).

Face à la raréfaction progressive des ressources fossiles et à la demande croissante en carburants, de nombreuses alternatives énergétiques ont vu le jour, telles que les biocarburants et le biogaz issus de matières organiques renouvelables. Toutefois, leur production à grande échelle reste souvent onéreuse ou tributaire de ressources agricoles. Dans ce contexte, la valorisation des déchets plastiques par pyrolyse se présente comme une voie prometteuse, permettant non seulement la production d'hydrocarbures (essence et gaz), mais aussi la réduction de l'empreinte environnementale de ces déchets.

Ce travail vise ainsi à recycler les bouteilles d'eau en plastique, principalement composées de polyéthylène téréphtalate (PET), en utilisant une technique thermo-chimique : la pyrolyse.

Le mémoire est articulé autour de trois chapitres :

- Le premier chapitre s'intéresse aux polymères, à leurs caractéristiques, à leurs usages, ainsi qu'aux impacts environnementaux liés à leur accumulation.
- Le deuxième chapitre explore la pyrolyse comme méthode de valorisation des déchets plastiques, en détaillant ses principes, ses paramètres opératoires.
- Le troisième chapitre présente la démarche expérimentale : réalisation de la pyrolyse de bouteilles en PET à l'aide d'un réacteur chauffé et analyse des produits obtenus.
- Enfin, la conclusion a synthétisé les résultats essentiels issus des essais en laboratoire, soulignant le potentiel de la pyrolyse en tant que méthode novatrice pour valoriser les déchets plastiques réputés non recyclables.

Chapitre I :

Les polymères et les déchets plastiques

Chapitre I : Les polymères et les déchets plastiques

I.1. Introduction

Avec l'essor des supermarchés et les nouvelles méthodes de conservation des produits, l'usage des emballages plastiques est devenu incontournable pour les consommateurs. Une fois leur fonction remplie, ces emballages finissent généralement parmi les déchets ménagers. Leur prolifération, en tant que matériaux non biodégradables, représente un véritable défi environnemental qu'il est urgent de résoudre. Une approche prometteuse consiste à recycler ces déchets en les réutilisant pour la fabrication de matériaux de construction. Ce chapitre présente une revue bibliographique sur le plastique ainsi que des définitions essentielles à la compréhension de cette étude [5].

I.2. Définition de polymère

I.2.1 Monomères

Les monomères constituent les unités de base des polymères. Issus de la chimie organique, ils sont formés d'atomes de carbone liés par des liaisons covalentes à des atomes d'hydrogène, d'oxygène, d'azote et, dans certains cas, à des atomes de chlore, de fluor ou de soufre. Le carbone, élément tétravalent, établit quatre liaisons covalentes orientées vers les sommets d'un tétraèdre régulier [6].

I.2.2 Polymères

Les polymères sont des substances caractérisées par la présence de longues chaînes moléculaires appelées macromolécules. Ces macromolécules résultent de l'enchaînement, par liaison covalente, d'unités constitutives ou groupes d'atomes appelés « mères », terme dérivé du grec « meros », signifiant « partie » [6].

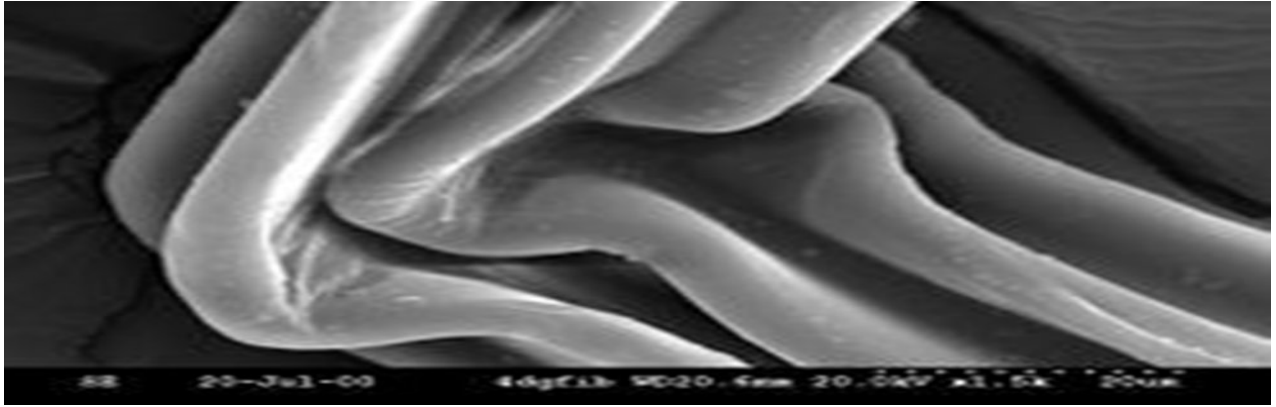


Figure I.1: Molécules de polymères [6].

I.3. Classification des polymères

Les polymères peuvent être classés selon plusieurs critères [7] :

I.3.1. Classification selon leur nature chimique

On distingue trois grandes catégories [7] :

- **Polymères minéraux** : Constitués de chaînes composées d'un seul élément (ex. : diamant, graphite, phosphore, soufre) ou contenant plusieurs hétéroatomes (ex. : silicates acides, poly phosphorique, chlorure de polyphosphonitrile).
- **Polymères organiques** : Regroupant une grande diversité de matériaux tels que les poly diènes, les polyacryliques, les polyamides et les polyvinyliques.
- **Polymères mixtes** : Possédant des propriétés spécifiques, notamment une bonne résistance thermique (300-350°C), comme les silicones.

I.3.2. Classification selon leur origine

Les polymères peuvent être naturels, artificiels ou synthétiques [7] :

- **Polymères naturels** : Issus des règnes végétal, animal ou minéral, ils jouent un rôle essentiel dans les mécanismes biologiques et économiques depuis des décennies.
 - Exemples : polysaccharides (cellulose, amidon), protéines (laine, soie), caoutchouc naturel.
- **Polymères artificiels** : Modifiés chimiquement à partir de polymères naturels pour améliorer certaines de leurs propriétés.

- Exemples : esters cellulosiques (nitrocellulose, acétate de cellulose), ébonite (caoutchouc fortement réticulé par le soufre).
- **Polymères synthétiques** : Produits à partir de monomères qui n'existent pas dans la nature, mais dont la structure s'inspire souvent des polymères naturels.

I.3.3. Selon leur domaine d'applications

Les polymères sont répartis en trois grandes catégories [7] :

- **Polymères de grande diffusion** : Aussi appelés polymères de commodité, ils sont produits en grandes quantités et largement utilisés au quotidien.
 - Exemples : polyéthylène, polystyrène, polychlorure de vinyle.
- **Polymères techniques** : Offrant des propriétés adaptées à des usages industriels et permettant de remplacer des matériaux traditionnels comme les métaux et les céramiques.
 - Exemples : polyamides, poly acétates.
- **Polymères spéciaux** : Destinés à des applications spécifiques grâce à leurs caractéristiques particulières (photo-actifs, thermostables, adhésifs, etc.).

I.3.4. Selon leur structure des chaînes (dimensionnalité)

Les polymères peuvent encore être classés en trois catégories [7] :

➤ **Polymères linéaires ou monodimensionnels**

Pour lequel, chaque chaîne macromoléculaire est constituée d'un nombre élevé mais fini d'unités monomères bivalents et une macromoléculaire linéaire peut être très schématiquement représentée par un trait continu divisé en intervalles représentant chacun une unité monomère (Figure). La chaîne polymère est constituée de longueur variable, propriété désignée par le terme poly molécularité.

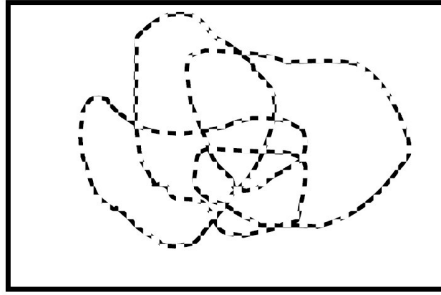


Figure I .2: Représentation de la chaine d'un polymère linéaire [7].

➤ **Polymères bidimensionnels**

Dont certains peuvent être produit par la nature (carbone graphite, kératine ...) ; dans le domaine des polymères synthétique ce sont encore des curiosités de curiosités. Ils se présentent sous la forme de feuillets bidimensionnels, d'épaisseur comparable à celle des molécules simples.

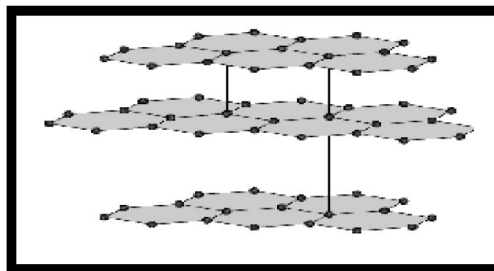


Figure I .3: Représentation schématique d'un polymère Bidimensionnel : le carbone Graphite [7].

➤ **Polymères tridimensionnels**

Qui résultante la polymérisation de monomères dont la valence moyenne est supérieure à deux ou encore de la réticulation (formation d'un réseau tridimensionnelle), par voie physique ou chimique, de polymères linéaires).

Leur dimension moléculaire peut être considérée comme infini puisque toutes les unirent monomères constituées d'un objet sont liées de façon covalente pour former une seule macromolécule.

Les laissons se développent dans les trois dimensions et un élément de volume d'un tel polymère peut être représenté sur la (Figure).

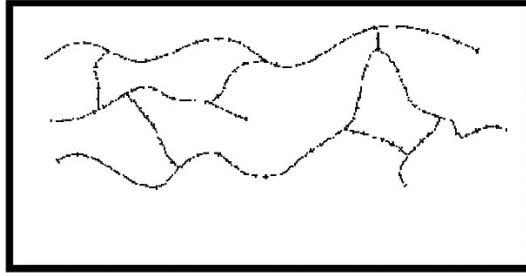


Figure 1.4: Représentation schématique d'un polymère Tridimensionnel [7].

I.3.5. Selon leur comportement thermique

Les polymères possèdent des propriétés thermiques variées qui influencent leur usage et leur transformation. Ils peuvent être regroupés en quatre grandes familles [7] :

- Les thermoplastiques
- Les thermodurcissables
- Les élastomères
- Les élastomères thermoplastiques

Ces polymères peuvent être des homopolymères ou des copolymères et sont obtenus par polymérisation (soit en chaîne, soit par polycondensation). Ils se distinguent par la structure de leurs macromolécules (linéaire, ramifiée ou réticulée), leur facilité de mise en œuvre et leurs propriétés d'élasticité.

I.3.5.1. Thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des polymères dont la structure est linéaire ou ramifiée. Ils peuvent être ramollis sous l'effet de la chaleur et durcis par refroidissement dans un intervalle de température spécifique. Ces polymères peuvent être amorphes ou semi-cristallins. Parmi eux, on retrouve [7] :

- Le polyéthylène (PE)
- Le polychlorure de vinyle (PVC)
- Le polystyrène (PS)

Ces matériaux sont généralement façonnés par divers procédés tels que l'injection, l'injection-soufflage, l'extrusion ou le roto-moulage. Dans la plupart des cas, après

refroidissement, les polymères retrouvent une structure partiellement cristalline ou amorphe.

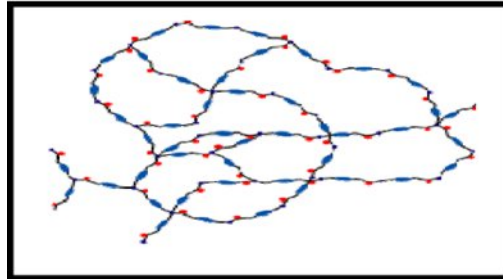


Figure I .5: représentation schématique d'un polymère thermoplastique [7].

I.3.5.2. Les thermodurcissables

Un thermodurcissable est un matériau, sous forme de poudre à mouler solide ou de résine liquide, qui se transforme irréversiblement par polymérisation en un réseau tridimensionnel infusible et insoluble, appelé thermo durci [7].

Dans l'industrie, le terme thermodurcissable est parfois utilisé de manière impropre pour désigner à la fois le système réactif initial (soluble et fusible) et le produit final (rigide et insoluble).

Le réactif initial peut être constitué d'un monomère ou d'un mélange de monomères (ex. : résines aminoplastes, phénoplastes, silicones) ou plus couramment d'un mélange de polymère linéaire de faible masse molaire et de monomère (ex. : résines époxy, résines polyesters insaturés).

La réticulation s'effectue sous l'action de la chaleur et/ou de catalyseurs. Ces polymères amorphes possèdent une température de transition vitreuse élevée (de 80°C à plus de 150°C). En raison de leur structure réticulée, ils ne présentent ni un état caoutchouteux ni un état liquide.

La mise en œuvre des thermodurcissables est plus complexe que celle des thermoplastiques, car leur mise en forme doit être réalisée simultanément à la réaction chimique de réticulation. Cependant, ils offrent une résistance mécanique, chimique et thermique bien supérieure à celle des thermoplastiques [7].

I.3.5.3. Les élastomères

Un élastomère est un polymère linéaire ou ramifié qui, après vulcanisation, devient un réseau tridimensionnel légèrement réticulé, infusible et insoluble.

Contrairement aux thermodurcissables, les élastomères sont caractérisés par leur élasticité caoutchouteuse, leur permettant de subir de très grandes déformations réversibles sous l'effet de contraintes mécaniques.

Ils peuvent s'étirer jusqu'à 500% de leur longueur d'origine et revenir à leur état initial en restituant l'énergie absorbée lors de la déformation [7].

I.3.5.4. Les élastomères thermoplastiques

Un élastomère thermoplastique est un polymère linéaire ou ramifié combinant les propriétés élastiques des élastomères et la facilité de mise en œuvre des thermoplastiques.

Ces matériaux sont souvent des copolymères à blocs ou des mélanges de polymères, dont la structure solide est constituée d'au moins deux phases distinctes non miscibles [7] :

- Une phase souple, avec une température de transition vitreuse entre -90°C et -40°C .
- Une phase rigide, avec une température de transition vitreuse ou de fusion supérieure à 90°C .

Ce sont donc des matériaux multi-phases, où la phase rigide est dispersée dans la phase souple, conférant aux élastomères thermoplastiques une excellente adaptabilité aux différentes applications industrielles.

I.3.6. Selon l'importance économique

Comme tout produit industriel, les polymères sont classés en fonction de leur volume de production et de leur prix, ce qui permet de les répartir en trois grandes catégories [7] :

- **Les polymères de grande diffusion** : Produits en très grandes quantités et vendus à prix réduit.
 - Exemples : Polyéthylène (PE), Polypropylène (PP), Polystyrène (PS), Polychlorure de vinyle (PVC).

- **Les polymères à haute performance** : Caractérisés par un faible volume de vente et un coût élevé, ces matériaux sont destinés à des applications spécifiques nécessitant des performances exceptionnelles.
- **Les polymères techniques** : Situés entre les deux catégories précédentes, leur volume de production et leur prix sont intermédiaires.
 - Exemple : Polyamide.

I.4. Type des polymères

Le tableau suivant donne quelques exemples de polymère types avec leur usage :

Tableau I.1 : Quelque type des polymères [8].

Les polymères	Les monomères	Utilisations
Polyéthylène PE	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	Bouteilles en plastique - Filaires électriques
Polypropylène PP	$\text{H}_2\text{C}=\text{C}\begin{matrix} \text{H} \\ \text{CH}_3 \end{matrix}$	Les conduites d'eau - chaises de maison - jouets pour enfants
Polybutadiène PB	$\text{CH}_2=\text{CH}=\text{CH}=\text{CH}_2$	Pneus - Caoutchouc industriel
Poly isobutylène	$\text{H}_2\text{C}=\text{C}\begin{matrix} \text{CH}_3 \\ \text{CH}_3 \end{matrix}$	Caoutchouc synthétique
le polychlorure de vinyle (PVC)	$\text{H}_2\text{C}=\text{C}\begin{matrix} \text{H} \\ \text{Cl} \end{matrix}$	Articles sur la santé - Pipes ...
Polystyrène PS	$\text{H}_2\text{C}=\text{C}\begin{matrix} \text{H} \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{matrix}$	Dispositifs de soutien isolateurs thermiques acoustiques
Acrylate de poly méthyle	$\text{H}_2\text{C}=\text{C}\begin{matrix} \text{CH}_3 \\ \text{COOCH}_3 \end{matrix}$	Verre substitut
Poly acrylonitrile	$\text{H}_2\text{C}=\text{C}\begin{matrix} \text{H} \\ \text{CN} \end{matrix}$	Texture synthétique
Nylon 6-6	$\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}_2$ $\text{HOOC}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{COOH}$	Tissus faits
Polyester Tergale	$\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$ $\text{HOOC}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{COOH}$	Fibres textiles - tissus ...

I.5. Propriétés des polymères

I.5.1. Propriétés thermiques (température)

Dans l'étude des matériaux polymères, deux températures fondamentales sont particulièrement importantes [9] :

- La température de transition vitreuse (T_g)
- La température de fusion (T_f)

La température de transition vitreuse est essentielle pour les polymères amorphes, notamment les thermoplastiques amorphes, qui ne possèdent pas de forces de cohésion significatives en dehors de l'enchevêtrement des chaînes moléculaires. Les zones cristallines d'un polymère ne fondent qu'à des températures bien supérieures à celle de transition vitreuse.

Les températures caractéristiques d'un même matériau peuvent être ordonnées ainsi :

**Température de transition vitreuse < Température de cristallisation <
Température de fusion < Température de décomposition thermique**

En fonction de la température à laquelle il est exposé, un polymère peut adopter des comportements mécaniques différents. Ce phénomène est particulièrement notable dans les thermoplastiques semi-cristallins, où des variations significatives peuvent apparaître même dans un faible intervalle de température [9].

I.5.2. Propriétés mécaniques

Le succès des polymères réside en grande partie dans leur aptitude à être façonnés facilement, notamment à l'état fondu. Leur malléabilité et leur plasticité sont à l'origine de leur appellation. Ces matériaux couvrent une large gamme de propriétés, allant des plus rigides, durs et cassants, aux plus mous (pâtes) ou élastiques (élastomères).

Les propriétés mécaniques d'un polymère décrivent son comportement sous l'effet de sollicitations telles que pressions, étirements, torsions, frottements, chocs ou encore sous l'influence de la pesanteur.

Certains polymères sont recherchés pour leur stabilité dimensionnelle (ex. : polyesters aromatiques), tandis que d'autres, comme les élastomères, sont particulièrement appréciés pour leur capacité d'absorption des chocs. Les élastomères sont largement utilisés dans la fabrication des pneus, semelles de chaussures, matelas, fibres textiles, et élasthanne (polyuréthane).

Les thermoplastiques et thermodurcissables sont soumis au phénomène de vitrification.

- En dessous de leur température de transition vitreuse, ils deviennent durs et cassants, à l'image du verre.

- Au-dessus de cette température, ils deviennent plus souples et plastiques.
- À l'extrême, ils adoptent un comportement élastique [10].

I.6. La polymérisation

La réaction qui sert à partir des monomères liés de manière répétée à la formation des composés de masse moléculaire plus élevés appellent les polymères ou macromolécules [11].

On distingue 2 types de polymérisation :

I.6.1. La polycondensation

Dans la polycondensation ou la polymérisation par étape, les monomères s'associent successivement et des réactions de condensations se déroulent entre les fonctions chimiques des monomères di ou polyfonctionnels avec l'élimination des petites molécules comme l'eau, l'ammoniac ... avec la formation de chaque liaison covalente formée.



[11,12,13]

I.6.2. La polymérisation en chaîne

La polymérisation en chaîne est le procédé industriel principal pour synthétiser des polymères à partir de monomères vinyliques (avec doubles liaisons). Elle se déroule sans élimination de sous-produits et permet une croissance contrôlée des macromolécules. Les étapes clés sont :

- Amorçage : Activation des premiers monomères pour former des centres réactifs.
- Propagation : Ajout successif de monomères, allongeant la chaîne polymérique.
- Terminaison : Arrêt de la réaction par disparition des sites actifs, fixant la taille finale du polymère [11,12,13,14].

Ce mécanisme offre un excellent contrôle des propriétés du matériau, d'où son utilisation massive dans l'industrie.

I.7. Les déchets plastiques

La pollution plastique correspond à l'accumulation massive de déchets plastiques et de leurs dérivés dans l'environnement.

Grâce à sa légèreté, sa résistance et son faible coût, le plastique est utilisé à grande échelle dans toutes les industries, notamment pour la fabrication de produits à usage unique. On estime qu'à l'échelle mondiale, plus de 10 tonnes de plastique sont produites chaque seconde, contribuant à la propagation de cette pollution [15].

I.8. L'impact des déchets plastiques

I.8.1. L'impact sur l'environnement

La pollution plastique se manifeste sous différentes formes : déchets visibles ou microparticules issues de la lente dégradation du matériau. Elle représente une menace majeure pour les écosystèmes terrestres et aquatiques, affectant la vie sauvage par :

- L'ingestion, qui entraîne des complications physiologiques pouvant être mortelles.
- L'enchevêtrement, empêchant les animaux de se déplacer ou de se nourrir correctement.
- L'exposition aux substances chimiques présentes dans le plastique, affectant la santé des organismes vivants.

À terme, ces contaminants remontent dans la chaîne alimentaire, atteignant l'Homme et posant des risques sanitaires importants [16].

Dans les océans, l'impact des déchets plastiques entraîne une réduction de la biodiversité marine. De nombreux oiseaux, mammifères et poissons succombent après avoir ingéré des morceaux de plastique qui perturbent leur métabolisme. Ce phénomène contribue à la détérioration des écosystèmes aquatiques, fragilisant l'équilibre de la faune et de la flore marines [17].



Figure I .6: L'effet des déchets plastique rejeté dans la nature sur les animaux marins et les arbres [5]

I.8.2. L'impact sur la santé

En plus de son impact environnemental, le plastique représente également un danger pour la santé en raison de certaines substances qu'il contient :

- **Perturbateurs endocriniens** : Ces composés chimiques interfèrent avec le système hormonal et peuvent être potentiellement cancérogènes.
- **Microplastiques** : De minuscules particules qui, une fois ingérées, s'accumulent dans les organes et peuvent avoir des effets nocifs sur l'organisme.
- **Lixiviation (ou lessivage) des substances chimiques** : Les contenants en plastique libèrent des substances toxiques dans les aliments, notamment lors du chauffage ou de manipulations inadéquates.

Ces éléments soulèvent des préoccupations majeures quant aux effets à long terme du plastique sur la santé humaine et renforcent la nécessité de réduire son usage, en particulier pour les emballages alimentaires [18].

I.9. Valorisation des déchets plastiques

I.9.1. Valorisation mécanique

Cette méthode est utilisée pour le traitement des déchets thermoplastiques, consiste à convertir les déchets en polymère sans modification de la structure chimique du matériau suivants plusieurs étapes : la collecte, le tri, le lavage et le broyage (figure). Ces étapes peuvent être effectués plusieurs fois s'il est nécessaire selon la source et la composition des déchets.

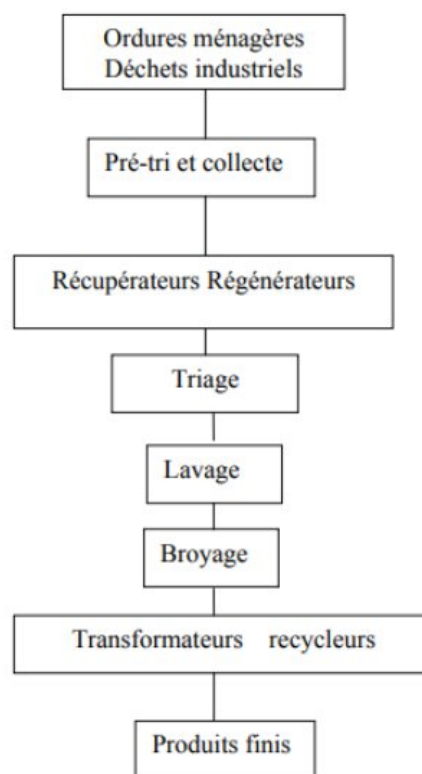


Figure I .7: Schéma simplifié des étapes du recyclage mécanique [19].

Les produits obtenus par cette méthode peuvent recycler avec un niveau de performance égal ou inférieur au produit original c'est-à-dire avec peu ou pas perte de qualité.

Les matières thermoplastiques sont fondues et moulées sous une nouvelle forme, généralement après avoir été broyées ou granulées. Les paillettes plastiques vont entamer une phase d'extrusion. Elle consiste à faire les fondre à 280°C dans une énorme machine pour donner des joncs qui seront refroidis dans l'eau puis coupés

pour former des granulés qui sont ensuite purifiés par polycondensation (procédé physique consistant à éliminer les dernières impuretés à l'échelle moléculaire).

Les granulés purifiés sont ensuite essorés et séchés avant d'être conditionnés pour être acheminés vers les usines de recyclage pour objectif de fabriquer de nouveaux produits à partir de plastique recyclé comme des bouteilles d'eau ou de jus de fruits, des rembourrages de couette, des écharpes en polaire etc... [13].

Bien que, à première vue, le recyclage mécanique des déchets plastiques semble être une opération « verte », l'opération de retraitement n'est pas rentable car elle nécessite une énergie élevée pour le nettoyage, le tri, le transport et le traitement [20].

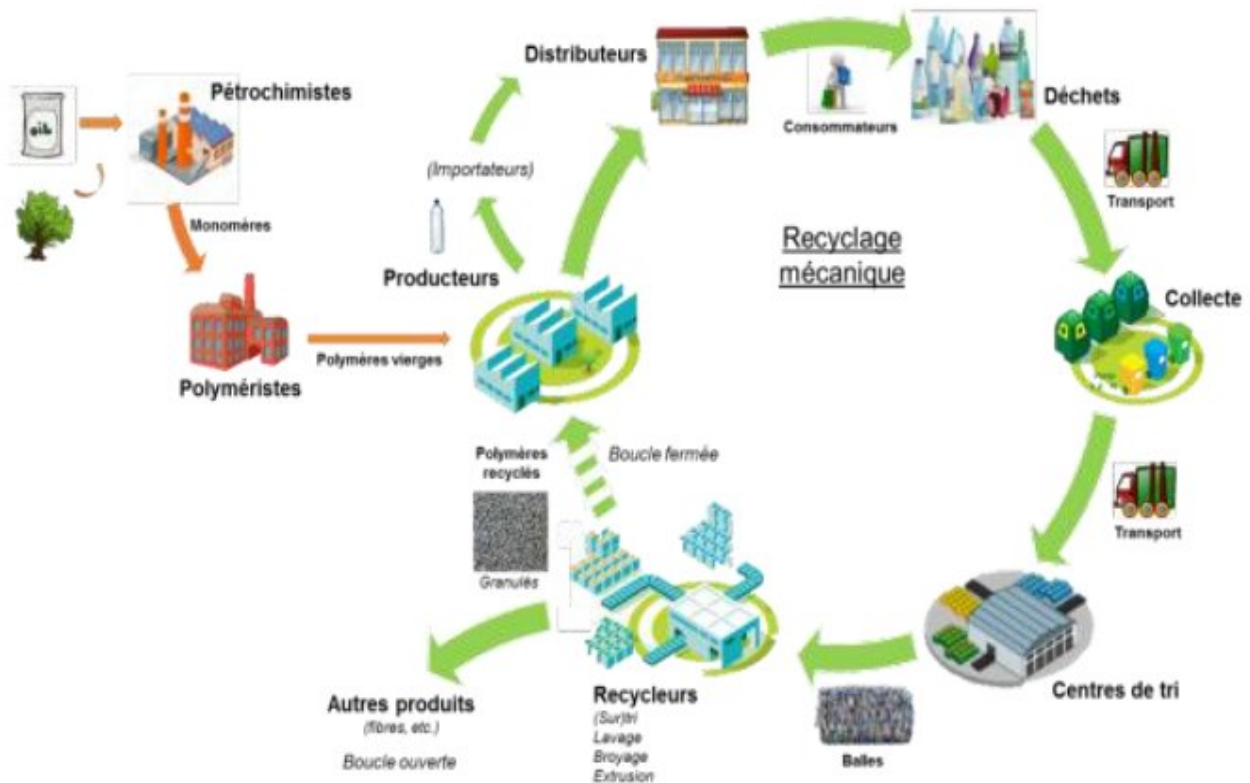


Figure 1.8: Le recyclage mécanique des plastiques [19].

I.9.2. Valorisation thermique

L'incinération permet de valoriser énergétiquement les déchets organiques en réduisant considérablement leur volume. Ce procédé thermique dégrade les hydrocarbures en produits de combustion (gaz, chaleur, résidus).

Cependant, son développement se heurte à une forte opposition dans les pays industrialisés, en raison :

- Des émissions de gaz à effet de serre (CO₂, etc.)
- De la production de polluants toxiques (dioxines, métaux lourds...)

Ces craintes environnementales et sanitaires freinent l'adoption des technologies de **valorisation énergétique des déchets**, malgré leur efficacité pour la gestion des volumes [20].

I.9.3. Valorisation chimique

La valorisation chimique des déchets polymères consiste à les transformer en monomères d'origine ou en autres produits chimiques valorisables, utilisables comme matières premières industrielles ou comme carburants. Trois approches principales sont employées : l'oxydation partielle, le craquage (thermique, catalytique et hydrocraquage) et la dépolymérisation, comme illustré dans la Figure 22.

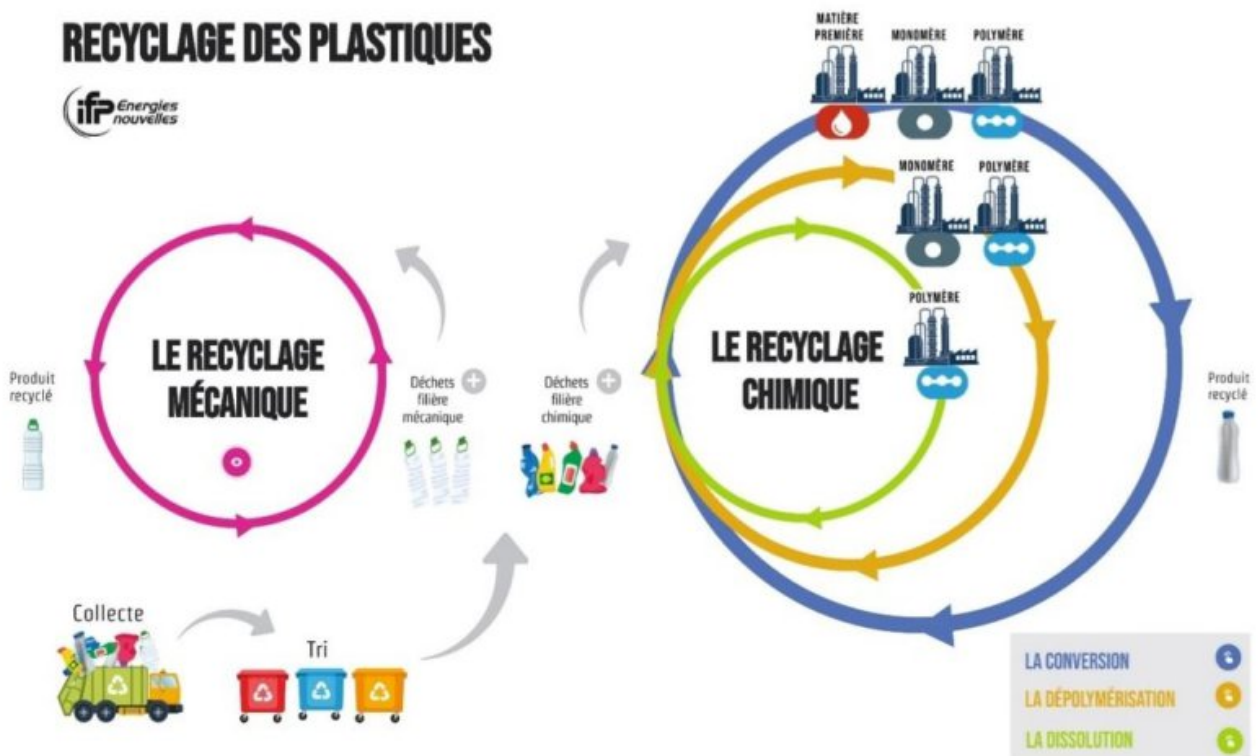


Figure I.9: Recyclage mécanique et chimique [21].

➤ Oxydation partielle

L'oxydation partielle représente une alternative à la combustion directe des polymères, cette dernière étant néfaste pour l'environnement en raison de l'émission de substances dangereuses

comme les hydrocarbures légers, les oxydes de soufre et les dioxines. En revanche, une oxydation contrôlée utilisant de l'oxygène et/ou de la vapeur peut générer un mélange utile d'hydrocarbures, de gaz de synthèse ($\text{CO} + \text{H}_2$) et même d'acide acétique, avec des rendements et une qualité qui varient selon le type de polymère traité.

➤ Craquage

Le craquage permet de décomposer les longues chaînes polymères en composés plus légers et plus utiles. Cette dégradation peut s'effectuer par hydrocraquage (en présence d'hydrogène) ou par craquage thermique/catalytique en atmosphère inerte. Les produits issus du craquage des plastiques trouvent des applications comme carburants ou produits chimiques intermédiaires.

➤ Dépolymérisation ou pyrolyse

La dépolymérisation par pyrolyse implique la dégradation thermique des polymères en l'absence d'oxygène, généralement à des températures comprises entre 350 et 900°C. Ce procédé génère un résidu solide et une fraction volatile qui peut être séparée en une huile hydrocarbonée condensable (contenant paraffines, iso paraffines, oléfines, naphtènes et aromatiques) et un gaz non condensable à haut pouvoir calorifique.

La répartition et la composition des différentes fractions obtenues dépendent principalement de la nature des déchets plastiques traités et des conditions opératoires (température, pression, temps de séjour, type de réacteur). Cependant, la dégradation thermique des polymères présente l'inconvénient de produire une gamme très large de composés. Un défi majeur réside dans la viscosité élevée et la faible conductivité thermique des plastiques, qui compliquent les transferts de chaleur et de matière, rendant crucial le choix du réacteur approprié.

Quel que soit le procédé utilisé, trois types de fractions sont systématiquement obtenus : des produits gazeux, des fractions liquides et un résidu solide. Le tableau 1 présente quelques exemples concrets de recyclage tertiaire des polymères [20].

I.10. Procédés et technologies de recyclage

Le processus de recyclage des matières plastiques suit une chaîne de traitement rigoureuse comprenant plusieurs étapes clés. La première phase consiste en la collecte des déchets plastiques issus de divers secteurs d'activité, notamment les

ménages, les zones industrielles et les commerces. Cette étape fondamentale permet de rassembler la matière première nécessaire au processus de valorisation.

Après la collecte, intervient une étape cruciale de tri sélectif. Les différents types de polymères sont séparés selon leur nature chimique, car chacun requiert des procédés de recyclage spécifiques. Parmi les plastiques les plus fréquemment recyclés, on trouve principalement le polyéthylène téréphtalate (PET), largement utilisé dans la fabrication de bouteilles de boissons, et le polyéthylène haute densité (PEHD), employé pour les contenants de produits ménagers.

Le nettoyage constitue la troisième étape essentielle du processus. Les matières plastiques triées subissent un lavage approfondi visant à éliminer toutes les impuretés, notamment les étiquettes adhésives, les résidus organiques et les contaminants chimiques. Cette phase de purification est déterminante pour garantir la qualité du produit recyclé final.

Vient ensuite l'étape de broyage mécanique, où les plastiques sont fragmentés en petits éléments appelés flocons ou paillettes. Ces fragments peuvent ensuite être soumis à un processus de fusion pour être moulés en nouveaux produits. Dans certains cas de figure, les flocons sont transformés en granulés réguliers, qui serviront de matière première standardisée pour la fabrication industrielle de divers articles en plastique. Cette étape de granulation permet d'obtenir une matière première homogène et facilement utilisable dans les procédés de transformation ultérieurs [22].

I.11. Avantages potentiels de la pyrolyse des plastiques en huile

La pyrolyse des déchets plastiques en huile présente plusieurs avantages majeurs, tant sur le plan environnemental qu'économique. Voici une synthèse des principaux bénéfices :

➤ Gestion des Déchets

La pyrolyse offre une solution durable pour traiter les plastiques non recyclables, réduisant ainsi leur accumulation dans les décharges et les océans. Contrairement à l'incinération, cette méthode limite les émissions polluantes et valorise les déchets en les transformant en ressources utiles.

➤ Récupération des Ressources

Les plastiques, issus de ressources pétrochimiques, possèdent une valeur énergétique élevée. La pyrolyse permet de récupérer cette énergie sous forme d'huile, de gaz et de charbon, contribuant ainsi à une économie circulaire.

➤ **Production d'Énergie**

L'huile issue de la pyrolyse peut être utilisée comme carburant dans divers secteurs (transport, industrie, production électrique), offrant une alternative aux énergies fossiles. Ses propriétés calorifiques sont comparables à celles des carburants conventionnels, comme le diesel ou l'essence.

➤ **Réduction des Émissions de Gaz à Effet de Serre**

En évitant la dégradation anaérobie des plastiques dans les décharges (source de méthane), la pyrolyse contribue à diminuer l'impact climatique. De plus, le processus en circuit fermé recycle le carbone présent dans les plastiques, limitant les émissions nettes.

➤ **Approche d'Économie Circulaire**

Cette technologie s'inscrit dans une logique de réutilisation des matériaux, réduisant la dépendance aux ressources vierges et favorisant une gestion plus durable des déchets.

➤ **Diversification des Sources d'Énergie**

L'huile pyrolytique enrichit le mix énergétique, renforçant la sécurité d'approvisionnement et réduisant la pression sur les réserves fossiles.

➤ **Recyclage Avancé**

La pyrolyse permet de régénérer les plastiques en matières premières pour de nouveaux produits, soutenant ainsi une industrie plus verte [23].

I.12. Limites et Contraintes Actuelles

- Difficultés techniques de tri des polymères complexes.
- Problématiques de purification des matériaux contaminés.

- Insuffisance des infrastructures de collecte sélective.
- Déficit de centres de traitement spécialisés.
- Coûts initiaux élevés de mise en œuvre.
- Variabilité de la qualité des matières premières secondaires.
- Nécessité d'amélioration des processus de transformation.
- Défis réglementaires et normatifs à surmonter [24].

I.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu les différents types de polymères, leurs propriétés et leurs types, et nous avons également constaté l'impact considérable et les dommages du déchets plastiques sur l'environnement ainsi que les différents niveaux de recyclage, ce qui nous donne un aperçu des différentes technologies atteintes par la recherche qui contribuent à réduire les dommages négatifs que le plastique cause à l'environnement.

Le chapitre suivant va contenue une des méthodes pour le traitement thermique des déchets plastiques en vue de leur valorisés : La pyrolyse, qui contribue la décomposition des longues chaînes en chaîne plus petits ou des monomères dans les meilleures conditions.

Chapitre II :
Généralités
sur
la pyrolyse

Chapitre II : Généralités sur la pyrolyse

II.1. Introduction

Le développement technologique de notre époque nous a permis d'atteindre de nombreux niveaux de recyclage du plastique qui se permet de pas seulement recycler mais à donner une valeur pour les produits notamment la valorisation secondaire, la valorisation thermique et la valorisation chimique.

Dans ce chapitre, nous mettrons en évidence un type de valorisation thermique du plastique, qui est la pyrolyse en soulignant sa définition, ses types, les facteurs contrôlant la pyrolyse, les différents produits obtenus et les meilleurs types de plastique qu'on peut utiliser dans ce processus et aussi un exemple pratique d'une étude sur la valorisation du plastique avec la pyrolyse.

II.2. Définition et principe de la pyrolyse du plastique

La pyrolyse du plastique est un procédé de dégradation thermique réalisé par chauffage en l'absence d'oxygène, réduisant ainsi les longues chaînes polymères du plastique en hydrocarbures beaucoup plus courts. Contrairement à l'incinération, pas de combustion. Ce procédé se déroule en quatre étapes : l'amorçage, le transfert, la décomposition et la terminaison, produisant des vapeurs et du charbon. Ces vapeurs de pyrolyse contiennent des gaz non condensables composée d'hydrogène, de méthane, de monoxyde de carbone, d'hydrocarbure et une fraction de condensable constituée essentiellement d'eau et d'huile (composée de paraffines, iso-paraffines, oléfines, naphènes et aromatiques). La condensation des vapeurs condensables forme la cire/huile de pyrolyse, une combinaison complexe des produits de craquage thermique [25,26]. La proportion de chaque fraction et leur composition dépendent principalement de la nature des déchets plastiques et des conditions du procès (la température, la pression, le temps de séjour, le type de réacteur, etc.). Un point à prendre en considération est la viscosité élevée et la faible conductivité thermique des plastiques, qui conduisent à des problèmes de transfert de chaleur et de masse [20].

Du point de vue écologique, la pyrolyse offre une solution alternative à la mise en décharge, ne provoque pas de contamination de l'eau et réduit les gaz à effet de serre (GES). Sur le plan financier, la pyrolyse produit un carburant à haut pouvoir calorifique

qui pourrait être facilement commercialisé et utilisé dans les moteurs à combustion interne pour produire de l'électricité et de la chaleur [13].

II.3. Les types de la pyrolyse

Selon les conditions de la pyrolyse on distingue 2 grandes types :

II.3.1. Pyrolyse lente (ou conventionnelle)

Ce type de pyrolyse est caractérisé par une vitesse de chauffe lente et un long temps de séjour. En pyrolyse lente, la matière est chauffée jusqu'à une température de l'ordre de 400 à 500°C avec une vitesse de chauffe d'environ 0,1 à 1°C/s pendant un temps compris entre 5 et 30 min. La pyrolyse lente favorise la formation de charbon, mais des produits liquides et gazeux sont également formés en petites quantités. Une vitesse de chauffe faible couplée avec un temps de séjour long entraîne des réactions secondaires ce qui aboutit finalement à une augmentation de la formation de charbon [13].

II.3.2. Pyrolyse rapide

Contrairement à la pyrolyse lente, au cours de la pyrolyse rapide, la charge du réacteur est chauffée rapidement avec des vitesses de chauffe élevées, et les vapeurs de pyrolyse sont immédiatement balayées hors de la zone chaude du réacteur et condensées. Le temps de rétention des vapeurs de pyrolyse est habituellement inférieur à 2s en pyrolyse rapide pour limiter les réactions secondaires qui décomposent les hydrocarbures lourds (huiles) en hydrocarbures légers (gaz). La pyrolyse rapide est utilisée pour la production des combustibles liquides au détriment du charbon et du gaz.

La pyrolyse Flash peut être considérée comme une forme améliorée de la pyrolyse rapide. En pyrolyse rapide, la vitesse de chauffe est très élevée de l'ordre de 1000°C/s. La température atteinte dans la pyrolyse Flash peut dépasser 900°C et les temps de réaction sont très réduits (0,1-1s). La vitesse de chauffe élevée combinée à une haute température et à un faible temps de séjour des vapeurs pyrolytiques conduit à un rendement de liquide élevé et réduit la formation de charbon [13].

II.4. Les conditions influençant la pyrolyse

Les facteurs influençant la pyrolyse affectent le rendement et la composition des produits et ils sont :

II.4.1. La température

La température est l'une des variables les plus importantes dans le procédé de pyrolyse, puisque la température contrôle le comportement de décomposition principal des polymères. Elle contrôle également la réaction de craquage des plastiques où la force de Van der Waals entre les molécules s'effondre en raison de l'augmentation de la vibration des molécules qui, d'autre part, tend à les évaporer et aboutit à la rupture de la chaîne du carbone. Par conséquent, la température présente un effet très important sur les produits de pyrolyse et sur les réactions secondaires.

A basse température, des hydrocarbures à longues chaînes sont produits, tandis qu'une augmentation de la température favorise la production des composés à courtes chaînes en raison du craquage des liaisons C-C.

La température a une influence sur la distribution des produits issus de la pyrolyse des déchets plastiques. Des études montrent qu'à 460°C, une grande proportion de liquides extrêmement visqueux à forte teneur en chaînes longues carbonées est obtenue, tandis qu'à 600°C, une faible proportion de liquides ayant fortes teneurs en aromatiques a été produite [27]. Une autre étude de l'effet de la température sur les réactions primaires et secondaires durant la pyrolyse thermique et catalytique du PEHD dans une gamme de température de 500-800°C a montré que les hydrocarbures ramifiés proviennent principalement des réactions secondaires qui se produisent en augmentant la température [28,30].

II.4.2. Temps de séjour

La définition du temps de séjour varie selon les études. Pour une pyrolyse rapide ou un processus de pyrolyse en continu, le temps de séjour représente le temps de contact du plastique avec la surface chaude du réacteur. Cependant, en pyrolyse lente ou en processus batch, le temps de séjour signifie la durée entre le début de chauffage de la matière première la fin de réaction où la totalité des produits est récupérée. Un temps de séjour plus long améliore la conversion des produits primaires en raison du craquage secondaire, ce qui donne plus de produits thermiquement stables tels que les hydrocarbures de poids moléculaire léger et les gaz non condensables.

Une étude est menée sur l'influence du temps de séjour sur la composition des produits du craquage thermique du PEHD dans un réacteur à lit fluidisé à cinq températures différentes variant entre 650 et 850°C avec un temps de séjour variant de 0,64 à 2,6 s a constaté que le temps de séjour a eu une grande influence sur la composition des produits de pyrolyse. Un rendement de liquide plus élevé a été obtenu à un temps de séjour plus long (2,57 s) pour une

température inférieure à 685°C [29]. Cependant, le temps de séjour a eu moins d'influence sur le rendement liquide et gazeux à une température supérieure à 685°C [30].

II.4.3. Type de réacteur

Réacteur batch et semi-batch

Un réacteur batch (Figure 01) est un système fermé où aucun réactif ni produit n'est ajouté ou retiré pendant la réaction. L'un de ses principaux atouts est qu'il permet d'atteindre un taux de conversion élevé en augmentant simplement le temps de réaction.

À l'inverse, un réacteur semi-batch offre la possibilité d'introduire des réactifs ou d'éliminer des produits de manière continue. Cette flexibilité, combinée à l'utilisation d'un agitateur, améliore le mélange entre les catalyseurs et les plastiques dans le réacteur, ce qui optimise le rendement liquide.

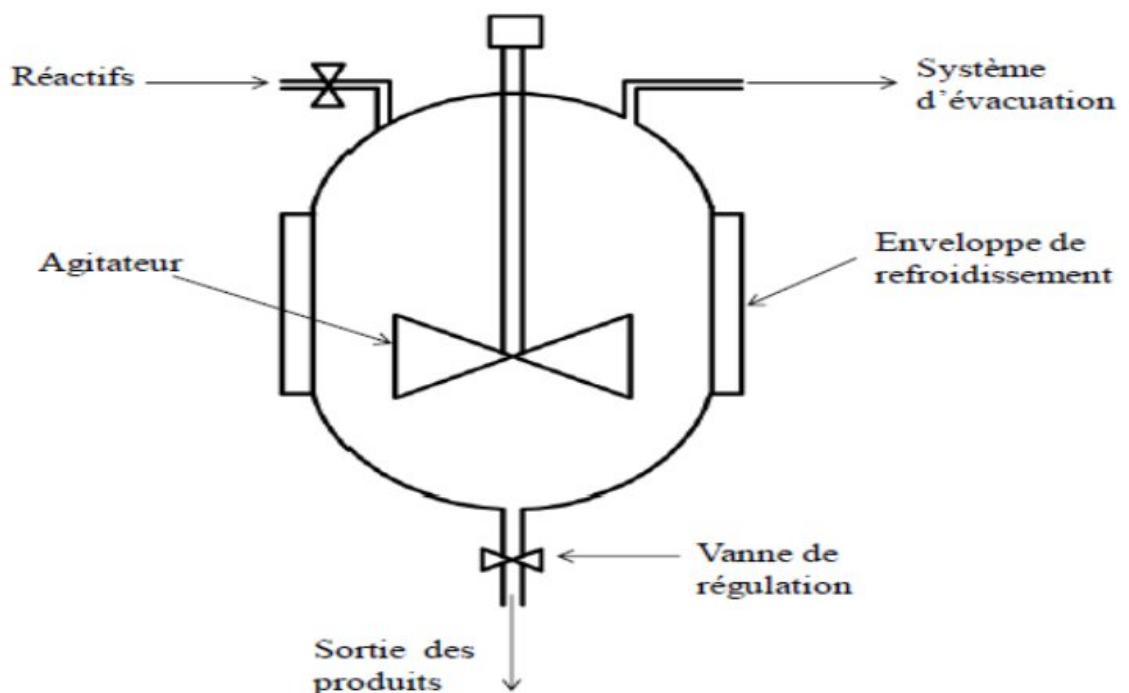


Figure II.1 : Illustration du réacteur batch avec un agitateur adaptée [13].

Cependant, les réacteurs batch et semi-batch présentent aussi des inconvénients : une certaine variabilité entre les lots, des coûts de main-d'œuvre élevés par cycle, et des difficultés pour une production à grande échelle.

Réacteurs à lit fixe et à lit fluidisé

Dans un réacteur à lit fixe, le catalyseur se présente généralement sous forme de pellets compactés dans un lit immobile. Bien que ce type de réacteur soit simple à concevoir, il présente certaines limitations. Par exemple, la taille et la forme irrégulières des particules de plastique peuvent compliquer l'alimentation du système. De plus, la surface active du catalyseur disponible pour la réaction reste relativement réduite.

Dans certains cas, les réacteurs à lit fixe servent uniquement de pyrolyseurs secondaires, chargés de craquer les fractions lourdes issues de la première pyrolyse. Dans cette configuration, la première étape se déroule dans un réacteur *batch* : les plastiques y sont chargés pour une décomposition thermique. Les gaz produits sont ensuite dirigés vers un deuxième réacteur (à lit fixe) où ils interagissent avec le catalyseur.

Un exemple concret de ce procédé en deux étapes a été développé par Aguado et al. (2007), comme le montre la **Figure 2**. Leur étude portait sur la pyrolyse thermo-catalytique du PEBD, utilisant des zéolithes (HZSM-5 et MCM-41) à des températures variantes entre 425 et 475°C [13].

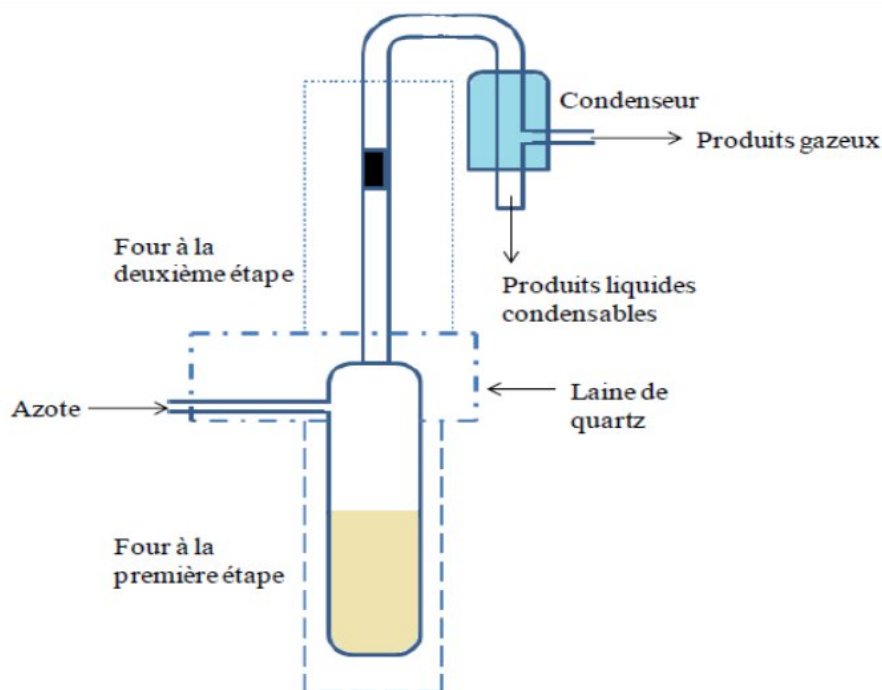


Figure II.2 : Schéma de pyrolyseur à deux étapes [13].

Ils ont observé que dans cette configuration et en l'absence de catalyseur à 425°C, seulement 53 à 55% du plastique était converti. Les 45-47% restants ne parvenaient pas à circuler dans le système réactionnel et demeuraient piégés dans le premier réacteur. En revanche, avec l'ajout d'un catalyseur, la conversion devenait totale, accompagnée d'une production importante de gaz (73,5% avec le n-HZSM-5 contre 58% avec l'Al-MCM-41).

Bien que ce type de réacteur permette de contourner certains écueils comme la récupération difficile du catalyseur après pyrolyse ou sa désactivation au contact du plastique fondu, son utilisation reste marginale à l'échelle industrielle. Cette réticence s'explique d'une part par des coûts peu compétitifs, et d'autre part par des performances globalement similaires à celles d'un procédé mono-étape.

Les réacteurs à lits fluidisés, couramment employés pour la pyrolyse rapide, se caractérisent par des taux de chauffage élevés et un excellent mélange de la matière première. Dans ce système, le catalyseur repose sur une plaque distributeur traversée par un gaz de fluidisation (généralement de l'azote), ce qui permet de maintenir les particules en état de fluidisation comme l'illustre la Figure 03. Cette configuration favorise l'accès au catalyseur grâce à son mélange intime avec le fluide, offrant ainsi une surface réactionnelle importante tout en assurant un bon transfert thermique et une bonne homogénéité des conditions de réaction.

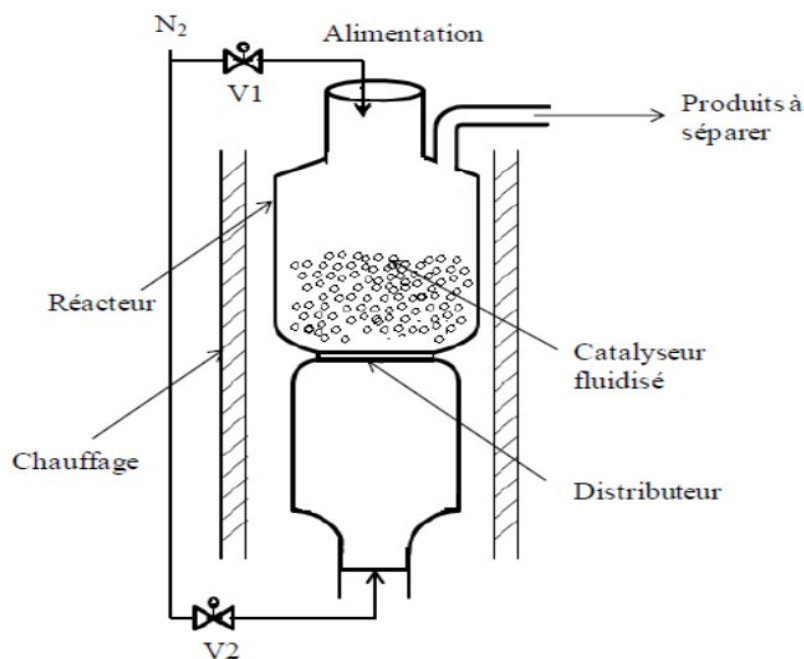


Figure II.3 : Schéma d'un système de pyrolyse catalytique formé d'un réacteur à lit fluidisé [13].

À 500°C, le produit majoritaire est un hydrocarbure lourd se solidifiant à température ambiante (gel). Lorsque la température augmente jusqu'à 700°C, on observe une nette diminution des fractions liquide et gel, compensée par une augmentation marquée de la production gazeuse (71%). Une étude menée par M.D.R. Hernández et al.[] Sur la pyrolyse catalytique du PEHD dans un réacteur à lit fluidisé a montré des rendements gazeux élevés (88,3% avec HZSM-5 et 83,4% avec HUSY à 500°C), restant relativement stables sur une plage de température allant jusqu'à 800°C.

Cependant, l'application industrielle des lits fluidisés pour la pyrolyse des plastiques se heurte à plusieurs difficultés pratiques. Le risque de défluidisation apparaît lorsque le plastique fondu adhère au lit, tandis que la nécessité d'utiliser une matière première finement divisée complique le procédé. De plus, la séparation entre le char et le matériau du lit s'avère délicate, tout comme la gestion du système de chauffage externe et de recirculation. Ces contraintes techniques expliquent pourquoi ce type de réacteur reste peu répandu dans les installations industrielles de grande capacité [13].

Réacteur CSBR (Conical Spouted bed reactor)

Ces réacteurs présentent l'avantage d'assurer un excellent transfert thermique entre les phases tout en évitant les problèmes de défluidisation et de colmatage du lit, fréquents dans les systèmes fluidisés classiques lorsqu'on traite des matériaux hétérogènes en taille ou en densité.

Plusieurs études ont exploité le réacteur CSBR (Conical Spouted Bed Reactor) pour analyser le craquage catalytique et non catalytique des polyoléfinés. Le principe de ce réacteur est illustré dans la Figure 04. Les principaux résultats montrent que :

- À 450°C, on observe un risque important de défluidisation, avec formation abondante de gel (80% pour le PE et 92% pour le PP)
- Le craquage s'intensifie nettement au-delà de 600°C, réduisant le rendement en gel jusqu'à 50%
- La température optimale se situe autour de 500°C, permettant à la fois d'éviter la défluidisation et de limiter la désactivation catalytique

Le fonctionnement de ces réacteurs est particulier : les plastiques introduits fondent et forment un film homogène autour des particules de sable grâce au mouvement cyclique du lit.

Un paramètre crucial est le maintien d'un temps de séjour très court (20 ms) pour prévenir les réactions secondaires responsables de la formation de char.

Cependant, l'exploitation de ce système se heurte à plusieurs difficultés techniques :

- Problèmes d'alimentation et de récupération du catalyseur
- Complexité de collecte des produits (liquides et solides)
- Conception mécanique complexe nécessitant de multiples pompes
- Coûts opérationnels élevés

Ces limitations techniques expliquent pourquoi cette technologie, bien que prometteuse sur le plan fondamental, rencontre des obstacles pour son déploiement industriel [13].

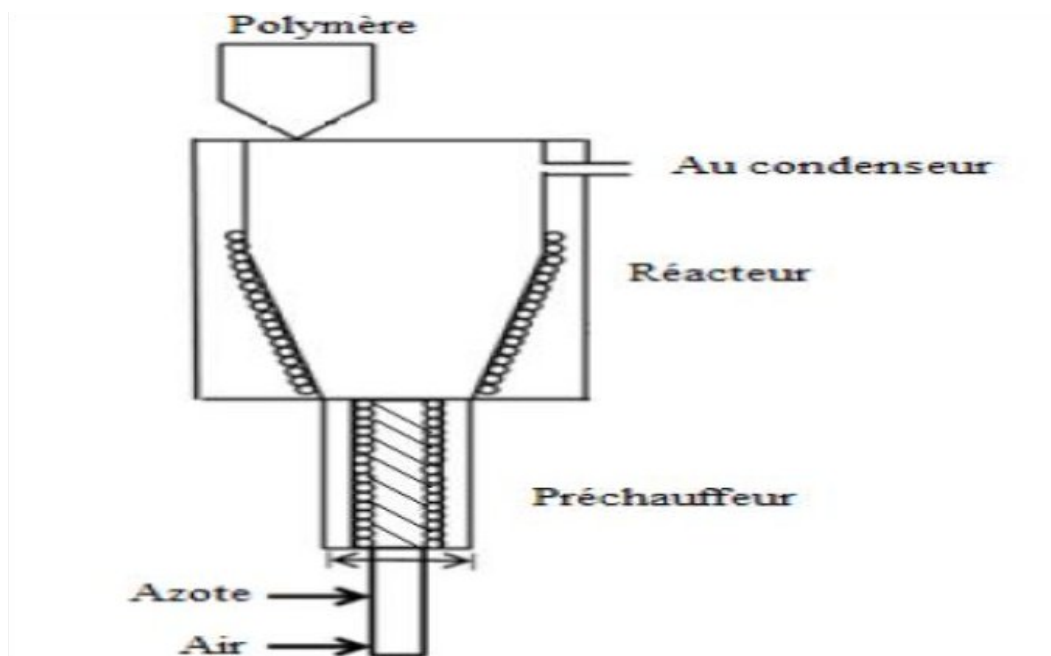


Figure II.4 : Schéma de principe du réacteur CSBR adapté [13].

Réacteurs à four à vis (Screwkilnreactor)

Les fours à vis se composent d'un réacteur tubulaire équipé d'un système de transport par vis. Ces réacteurs offrent plusieurs avantages, notamment une manipulation aisée des polymères, une grande flexibilité d'utilisation et une capacité à traiter les déchets plastiques en continu. Le temps de séjour du polymère peut être précisément contrôlé en ajustant la vitesse de rotation de la vis, ce qui permet également d'obtenir un transfert de chaleur optimal et un contrôle précis de la température de pyrolyse.

Le système fonctionne selon un principe bien défini : le mélange de plastique et de catalyseur est introduit dans une trémie chauffée sous atmosphère d'azote, puis transporté par la vis vers le réacteur. Celui-ci est divisé en deux zones de réaction maintenues à des températures différentes. Une fois le régime stationnaire atteint, les produits sont séparés à la sortie en gaz et en condensats grâce à un système de condensation.

Les études ont montré qu'à 450°C et en présence de catalyseur, ce système permet d'obtenir une conversion améliorée de la matière ainsi qu'une sélectivité accrue vers les hydrocarbures de type essence (C5-C12). Dans la configuration testée, le réacteur à vis fonctionnait en continu, avec une particularité : le catalyseur était placé dans un réacteur à lit fixe situé en aval du four à vis.

Cette technologie présente donc des caractéristiques intéressantes pour la pyrolyse des plastiques, combinant efficacité de conversion et flexibilité opérationnelle. Cependant, comme pour les autres systèmes, son implémentation à l'échelle industrielle nécessite une évaluation approfondie des paramètres économiques et techniques [13].

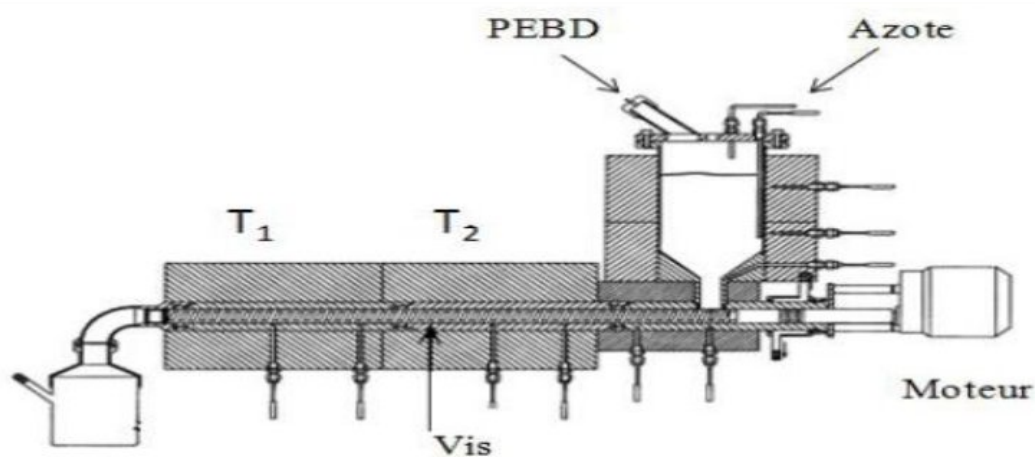


Figure II.5 : Schéma du réacteur de four à vis adapté [13].

Autres réacteurs et technologies de pyrolyse

Au cours des dernières décennies, diverses conceptions innovantes de réacteurs ont été développées pour optimiser la pyrolyse des déchets plastiques, notamment en améliorant la manipulation des matériaux et le transfert de chaleur vers les polymères.

Parmi ces avancées, la pyrolyse assistée par micro-ondes (MAP) se distingue par son efficacité thermique. Cette technique permet un chauffage rapide et sélectif des plastiques grâce à la conversion directe de l'énergie micro-onde en chaleur, avec des températures pouvant atteindre 1000°C en un temps record lorsqu'on utilise un absorbeur comme le carbone. Cependant, son application industrielle reste limitée par le manque de données précises sur les propriétés diélectriques des flux de déchets, paramètre crucial pour évaluer l'efficacité du chauffage. Les plastiques, ayant naturellement une faible constante diélectrique, voient leur absorption améliorée par l'ajout de carbone, mais cette efficacité varie considérablement selon les matériaux.

D'autres approches innovantes ont émergé, comme un système continu combinant une vis d'alimentation et un réacteur tubulaire horizontal, conçu pour optimiser la distribution des produits et l'introduction simultanée de catalyseur acide avec le plastique. Une autre conception utilise un réacteur à cône rotatif associé à un lit fluidisé bouillonnant (BFB) pour chauffer du sable, lequel est ensuite recyclé vers le cône via une colonne ascendante, assurant ainsi un apport continu de chaleur pour la pyrolyse.

Des solutions plus originales ont également été explorées, comme un réacteur tubulaire à lit de métal fondu, où le contact direct polymère-métal améliore considérablement le transfert de chaleur tout en éliminant le besoin d'agitation mécanique. Enfin, le réacteur à sphères circulantes, constitué de trois réacteurs agités en cascade, utilise le mouvement cyclique de sphères d'acier pour garantir un mélange homogène et des taux de transfert thermique élevés, avec une capacité de traitement pouvant atteindre 3kg/h en fonctionnement continu [13].

II.4.4. L'absence ou la présence du catalyseur

L'analyse chromatographique des carburants liquides issus de la pyrolyse du PP et du PE (avec et sans catalyseur) révèle des différences significatives dans leur composition moléculaire. Les Figures 6 et 7 illustrent clairement ces variations en classant les composés selon leur longueur de chaîne carbonée.

Pour le polypropylène (PP), la pyrolyse conventionnelle (non catalytique) produit principalement des hydrocarbures en C7-C30, avec un pic de distribution autour du C9. L'introduction d'un catalyseur modifie radicalement ce profil : on observe alors une nette augmentation des fractions légères (C5-C11), qui représentent jusqu'à 70% du produit final [13]. Ce décalage vers des molécules plus courtes démontre l'action craquante du catalyseur,

qui favorise la rupture des chaînes polymères longues en fractions plus légères, similaires à celles présentes dans les essences.

Des tendances comparables ont été observées pour le polyéthylène (PE), bien que les distributions spécifiques diffèrent légèrement en raison de la structure chimique distincte de ce polymère. Ces résultats confirment l'efficacité des catalyseurs pour orienter sélectivement les produits de pyrolyse vers des fractions plus valorisables sur le plan énergétique et commercial.

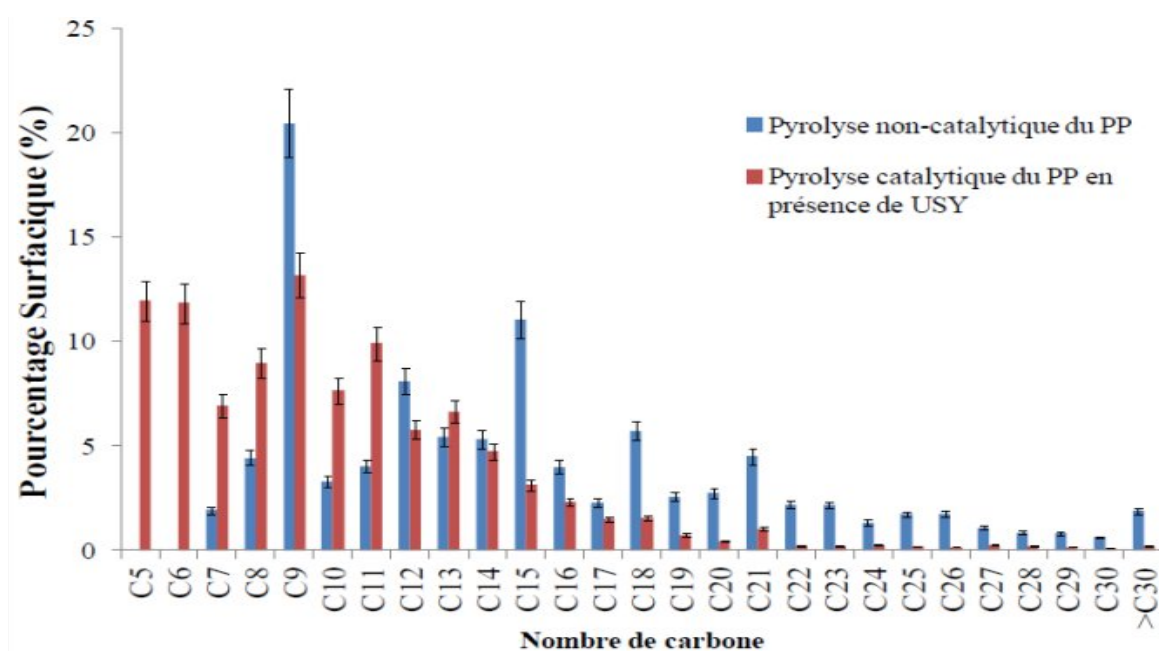


Figure II.6 : Distribution du nombre de carbone du liquide dérivé de la pyrolyse [13].

L'analyse des produits de pyrolyse du polyéthylène (PE) révèle des différences marquées entre les procédés catalytique et non catalytique, comme le montre la Figure 07.

Dans le cas de la pyrolyse thermique conventionnelle (sans catalyseur), la distribution des hydrocarbures s'étend sur une plage importante (C8-C39), avec une prédominance nette des fractions lourdes (C18-C21). Ce profil reflète le mécanisme de dépolymérisation aléatoire caractéristique de la dégradation thermique simple.

L'ajout d'un catalyseur modifie significativement cette distribution. Bien que la gamme globale reste large (C5-C39), on observe :

- Un élargissement vers les fractions plus légères (apparition de composés en C5-C7)
- Un déplacement notable du pic de distribution vers des chaînes plus courtes (C10-C13)

- Une nette réduction des fractions les plus lourdes

Cette modification de la distribution moléculaire démontre l'action sélective du catalyseur, qui favorise les réactions de craquage conduisant à des hydrocarbures plus légers, tout en limitant la formation de composés à longues chaînes. Ces résultats corroborent les observations faites pour le PP et confirment l'efficacité des catalyseurs pour orienter la pyrolyse vers des produits à plus haute valeur ajoutée [13].

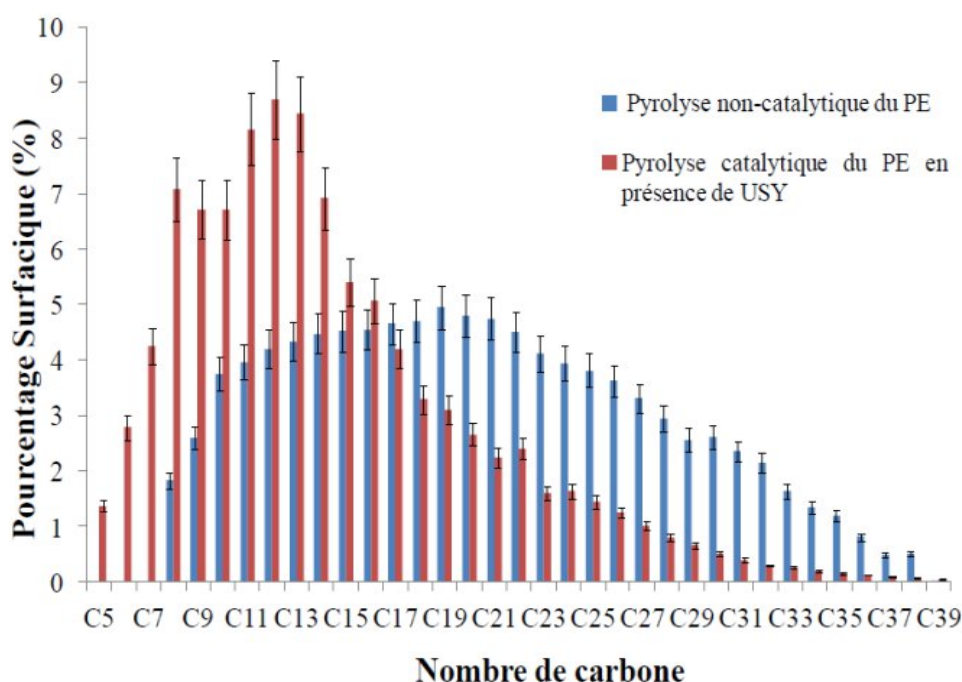


Figure II.7 : Distribution du nombre de carbone du liquide dérivé de la pyrolyse catalytique et non- catalytique du PE [13].

II.4.5. La nature de la charge

L'analyse des produits pyrolytiques révèle que leur répartition et composition moléculaire varient sensiblement selon deux paramètres fondamentaux : la typologie des matières plastiques traitées et les conditions opérationnelles mises en œuvre (régime thermique, durée de traitement, configuration réactionnelle, etc.). Toutefois, la conversion thermique des macromolécules en composés légers présente une limitation intrinsèque : elle engendre systématiquement un spectre de produits extrêmement diversifié.

Une contrainte majeure découle des propriétés physico-chimiques des polymères, caractérisées par une viscosité marquée et une conductivité calorifique réduite, générant des

difficultés notables pour les phénomènes de transfert thermique et matière. Ces particularités confèrent une importance déterminante à la sélection de la technologie réactionnelle.

Indépendamment des paramètres appliqués, le traitement pyrolytique conduit inévitablement à la formation de trois catégories distinctes de produits :

- Des effluents gazeux
- Des condensats hydrocarbonés
- Des résidus carbonés solides

Des applications industrielles variées de cette approche sont répertoriées dans l'annexe comparative jointe, mettant en évidence les relations entre les méthodologies employées et les rendements obtenus.

Tableau II.1 : Valorisation des déchets de polymères par voie chimique [13].

Température (°C)	Type de réacteur	Procédé	Matière première	Produits obtenus
420-460	Réacteur semi-discontinu	Pyrolyse	PEHD	Diesel
398-465	Gray-King	Craquage thermique	PE	Propenylbenzène buténylbenzène
445-485	Tube en acier	Craquage thermique	PE	Essence
450	Réacteur à lit fixe	Craquage catalytique	PEBD	Essence
400-550	Réacteur semi-discontinu	Pyrolyse thermique	PEHD	Essence, kérosène et diesel
330-490	Réacteur discontinu à lit flottant	Craquage thermique	PEHD	Diesel
420-450	Distillateur + colonne de raffinage	Craquage catalytique	PE + PP	Diesel
300-400	Réacteur tubulaire semi discontinu	Craquage thermique	PEBD-PEHD	Essence-diesel

II.5. Le Meilleur Type De Plastique Pour La Pyrolyse

La sélection des plastiques adaptés à la pyrolyse repose sur deux critères majeurs : l'efficacité du procédé et la sécurité des sous-produits générés. Tous les plastiques ne sont pas compatibles avec cette technologie, car certains libèrent des gaz toxiques lors de leur décomposition thermique. Les polyoléfines, telles que le PEHD, le PEBD, le PP et le PS, sont les plus appropriées, avec le PS produisant la plus grande quantité d'huile liquide. En revanche, le PVC et le PET doivent être évités en raison des émanations nocives qu'ils génèrent. De plus, les plastiques issus de la consommation courante ainsi que ceux collectés dans les déchets solides municipaux constituent des matières premières viables pour la pyrolyse [31].

II.5.1. Aptitude des plastiques à la pyrolyse

- **Polyoléfines** : Le PEHD (polyéthylène haute densité), le PEBD (polyéthylène basse densité), le PP (polypropylène) et le PS (polystyrène) sont particulièrement adaptés à la pyrolyse. Leur dégradation thermique génère un bon rendement en huile liquide et des sous-produits relativement sûrs.
- **PVC et PET** : Le PVC (chlorure de polyvinyle) et le PET (polyéthylène téréphtalate) ne sont pas recommandés pour ce procédé, car leur pyrolyse entraîne la libération de gaz toxiques [31].

II.5.2. Rendement de l'huile liquide

- **Polystyrène (PS)** : Ce plastique offre le rendement le plus élevé en huile liquide, atteignant 70 % et 60 % selon le catalyseur utilisé (TA-NZ et AA-NZ, respectivement). C'est donc une option particulièrement intéressante.
- **Polypropylène (PP) et polyéthylène (PE)** : Bien qu'ils produisent aussi des quantités notables d'huile liquide, leur rendement reste inférieur à celui du PS [31].

II.5.3. Types de déchets plastiques adaptés à la pyrolyse

- **Plastiques post-consommation** : Déchets plastiques issus de la consommation quotidienne, facilement exploitables par la pyrolyse.
- **Plastiques triés des déchets solides municipaux** : Une autre source viable pour cette transformation.
- **Refus du recyclage mécanique** : Certains plastiques non recyclables par des méthodes conventionnelles peuvent être valorisés via la pyrolyse.

- **Emballages multicouches** : Leur structure composite complique le recyclage classique, mais les rend intéressants pour la pyrolyse.
- **Plastiques mixtes contenant du PET/PVC** : Bien que leur traitement demande une prudence accrue à cause des émissions de gaz toxiques, ils peuvent être pris en compte dans des procédés spécifiques.

II.6. Exemple pratique

La pyrolyse plastique est un procédé de distillation permettant de transformer des déchets plastiques en carburant. Les déchets sont chauffés à plus de 400°C dans une première cuve et se transforment en gaz. Selon les températures de condensation (refroidissement) de ce gaz, on obtient différents types de carburant :

- Entre 390 et 170°C, le gaz condensé produit du gazole (diesel).
- Entre 210 et 20°C, le gaz condensé produit de l'essence.
- En dessous de 20°C, il reste du gaz résiduel incondensable qui peut servir à alimenter la chauffe du procédé.

Dans le cadre de ce prototype, On utilise uniquement du polypropylène (PP) et/ou du polyéthylène haute densité (PEHD) et basse densité (LDPE). A noter qu'une majorité de polypropylène donnera plus d'essence, de même qu'une majorité de polyéthylène donnera plus de diesel. Il est cependant possible de mélanger les deux [32].

II.6.1. Matériaux

- 1 grande cuve en inox avec couvercle
- 3 petites cuves en inox
- Tube en cuivre (diamètre 6mm)
- 7 passe-parois en cuivre (pour l'étanchéité des raccords)
- Joint torique (pour l'étanchéité des cuves)
- Déchets plastiques PP et/ou PEHD / LDPE [32].

II.6.2. Outils

- Soudure

- Un système de chauffe (minimum 400°C)
- Gaz butane/propane en bombe (375 ml) [32].

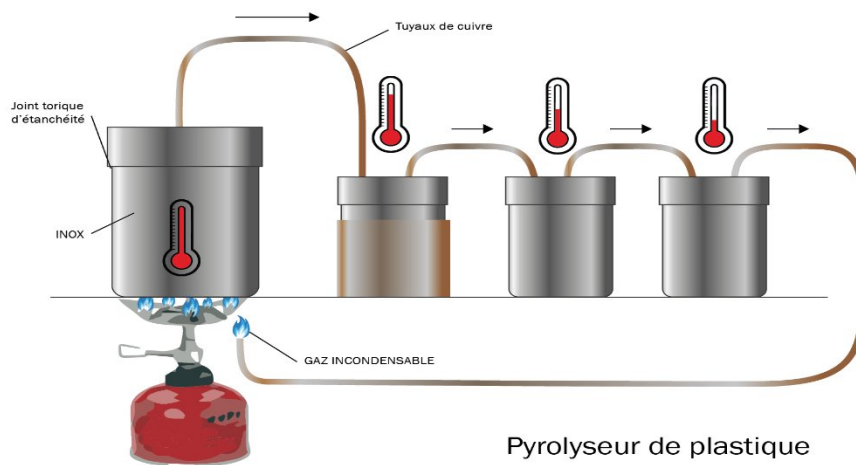


Figure II.8 : Pyrolyseur de plastique [32].

II.6.3. Les Étapes

- **Étape 1** - Tasser la première cuve de plastique

Pour ce test, les déchets plastiques sont majoritairement composés de polypropylène



[32].

Figure II.9 : les déchets plastiques [32].

- **Étape 2** - Préchauffer la deuxième cuve

Ce préchauffage est indispensable. Il permet la condensation des gaz à haute température avant de passer dans les deux dernières cuves [32].



Figure II.10 : Pyrolyseur de plastique [32].

- **Étape 3** - Apparition du gaz résiduel

Laisser se consommer le plastique jusqu'à l'obtention du gaz incondensable. Il vient comme un apport au gaz utilisé initialement. Pour ce test, 125mL de gaz en bombe ont été utilisés, auxquels s'est ajouté le gaz résiduel [32].



Figure II.11 : Pyrolyseur de plastique [32].

- **Étape 4** - Récupération du carburant

Ici, le dispositif a chauffé pendant environ 1h. Éteindre le système et laisser refroidir avant d'ouvrir les cuves. On obtient environ 125mL de carburant dans la cuve n°2 et 30mL dans la cuve n°3.

- Résultat du test à confirmer en laboratoire [32].



Figure II.12 : Les résultats [32].

II.7. Les Principaux Produits De La Pyrolyse

La pyrolyse est un procédé thermique permettant la décomposition de matières organiques en l'absence d'oxygène, conduisant à la formation de divers produits valorisables. Elle génère principalement trois types de produits : des résidus solides (charbon ou coke), des produits liquides (huile de pyrolyse ou goudron) et des gaz non condensables (syngas). Ces produits trouvent de nombreuses applications, allant de la production d'énergie aux usages industriels et agricoles. Leur composition et leur rendement dépendent des caractéristiques de la matière première ainsi que des paramètres du processus, notamment la température, la vitesse de chauffage et la durée de réaction. Une bonne compréhension de ces produits est essentielle pour optimiser la pyrolyse et en maximiser les bénéfices [33].

II.7.1. Résidus solides (charbon ou coke)

Définition : Les résidus solides issus de la pyrolyse sont des matériaux riches en carbone, souvent appelés charbon ou coke selon la matière première et les conditions du procédé.

Composition : Le charbon contient principalement du carbone et des cendres, tandis

que le coke représente une forme plus raffinée de carbone avec moins d'impuretés.

Applications :

- **Production d'énergie** : Utilisés comme combustibles solides pour générer chaleur et électricité.
- **Sorbants** : Ces matériaux sont employés dans le traitement des eaux et la filtration de l'air pour capturer les polluants.
- **Agriculture** : Le biochar, une forme de charbon, sert d'amendement du sol pour améliorer la fertilité et favoriser le stockage du carbone.
- **Briquetage** : Le charbon peut être transformé en briquettes afin de simplifier sa manipulation et son transport [33].

II.7.2. Produits liquides (huile de pyrolyse ou goudron)

Définition : Les produits liquides issus de la pyrolyse comprennent des fractions condensables telles que les huiles légères, les huiles lourdes et le goudron.

Composition : L'huile de pyrolyse est un mélange complexe contenant des hydrocarbures, des phénols et divers composés oxygénés.

Applications :

- **Combustibles alternatifs** : L'huile de pyrolyse peut remplacer les carburants traditionnels dans les chaudières et les moteurs.
- **Matière première chimique** : Elle peut être raffinée pour produire des composés chimiques ou servir de précurseur au biodiesel.
- **Utilisations industrielles** : Le goudron et les huiles lourdes sont employés dans les secteurs de la construction (routes, toitures) et dans diverses industries [33].

II.7.3. Gaz non condensables (Syngas)

Définition : Les gaz non condensables issus de la pyrolyse ne se liquéfient pas à température ambiante. Ils sont généralement regroupés sous l'appellation de gaz de synthèse.

Composition : Le syngas contient des gaz combustibles tels que l'hydrogène (H₂), le méthane (CH₄) et le monoxyde de carbone (CO), ainsi que divers hydrocarbures (C_nH_m). Il peut aussi renfermer des gaz non combustibles comme le dioxyde de

carbone (CO₂) et l'azote (N₂).

Applications :

- **Production d'énergie** : Utilisé comme combustible dans les brûleurs ou les systèmes de cogénération pour générer chaleur et électricité.
- **Synthèse chimique** : Il constitue une matière première pour la fabrication de produits tels que le méthanol et l'ammoniac.
- **Chaleur de procédé** : Dans certaines installations, le syngas est recyclé pour alimenter thermiquement le processus de pyrolyse [33].

II.8. Conclusion

Le procédé de pyrolyse est étudié pour son aptitude à valoriser divers types de plastiques en produisant de l'huile liquide exploitable, du gaz et des résidus solides. Il représente une solution efficace pour la conversion des thermoplastiques, notamment lorsqu'ils proviennent de déchets. En facilitant leur transformation, la pyrolyse permet d'améliorer la gestion des déchets, de réduire l'enfouissement et d'atténuer la pollution [34].

Si elle est mise en œuvre avec des dispositifs de contrôle de la pollution et des pratiques durables, la pyrolyse des plastiques peut s'inscrire dans une démarche écologique. Grâce à sa capacité à limiter les déchets plastiques, à récupérer les ressources et à réduire les émissions de gaz à effet de serre, elle constitue une technologie prometteuse. Néanmoins, son impact environnemental doit être scrupuleusement maîtrisé afin d'éviter tout effet négatif [35].

Chapitre III :

Partie pratique

Chapitre III : Partie pratique

III.1. Objectif de l'expérience

L'objectif de cette étude est de réaliser la pyrolyse des déchets plastiques dans un réacteur de laboratoire artisanal afin de produire des produits liquides et gazeux ainsi qu'un résidu solide. Le système mis en œuvre s'inspire du principe de fonctionnement d'un autocuiseur avec un contrôle rudimentaire de la température et de la pression.

III.2. Matériaux et équipements utilisés

-Réacteur de pyrolyse artisanale (bouteille de gaz fabriquée à la main).

Le réacteur a été conçu à partir d'une bouteille de gaz modifiée. La partie supérieure était dotée d'une grande ouverture amovible, fixée par trois attaches, pour permettre l'extraction des résidus solides. Une seconde ouverture, plus petite, permettait l'évacuation du gaz. À son extrémité, une soupape de sécurité était installée, suivie d'une vanne régulant le débit de gaz vers un tube en cuivre.

De plus, une petite ouverture était spécialement conçue pour accueillir un thermomètre et un manomètre afin de surveiller la température et la pression à l'intérieur du réacteur pendant le processus de pyrolyse.

- Réalisé par : MAROUANI Anas
- L'idée de : Dr SAADI Chahrazed



Figure III.1 : Le réacteur.

- Source de chaleur (bouteille de gaz + poêle thermique) capable d'atteindre 400°C.



Figure III.2 : bouteille de gaz + poêle thermique.

- Condenseur (tube en cuivre et serpentín plongé dans l'eau froide).



Figure III.3 : Condenseur.

- Erlenmeyer : L'Erlenmeyer joue un rôle essentiel dans la récupération du liquide issu de la condensation des gaz produits par la pyrolyse du plastique. Une fois que les gaz chauds traversent le serpentín immergé dans de l'eau froide, ils subissent un refroidissement partiel, entraînant leur condensation sous forme liquide. Ce liquide est alors collecté dans l'Erlenmeyer.

Par ailleurs, ce dernier est équipé d'un second orifice relié à une baudruche, destinée à capter les gaz non condensables générés au cours du processus.



Figure III.4 : Erlenmeyer.

- Baudruche : La baudruche est destinée à recueillir les gaz non condensables générés lors de la pyrolyse. Même après leur passage dans le serpentin refroidi, ces gaz conservent leur état gazeux. Ils traversent l'Erlenmeyer avant d'être piégés dans la baudruche, ce qui permet d'estimer le volume produit, de les stocker brièvement, et de les analyser ou de les valoriser comme source d'énergie potentielle.



Figure III.5 : Baudruche.

- Valve de sécurité (6 bars) : La soupape de sécurité constitue un élément clé du dispositif, conçu pour protéger le réacteur contre une pression interne excessive. Si la pression dépasse un seuil critique, elle s'active automatiquement afin d'évacuer une partie des gaz, réduisant ainsi les risques d'explosion ou de détérioration de l'équipement. Elle assure ainsi la stabilité et la sécurité du système durant toute la phase de pyrolyse.



Figure III.6 : Valve de sécurité.

-Déchets plastique. Bouteille d'eau miérale



Figure III.7 : Déchets plastique.

-Balance électronique. Photo de balance

-Gant, bavette, blouse de laboratoire.

-Chronomètre.

III.3. Schéma du montage expérimental

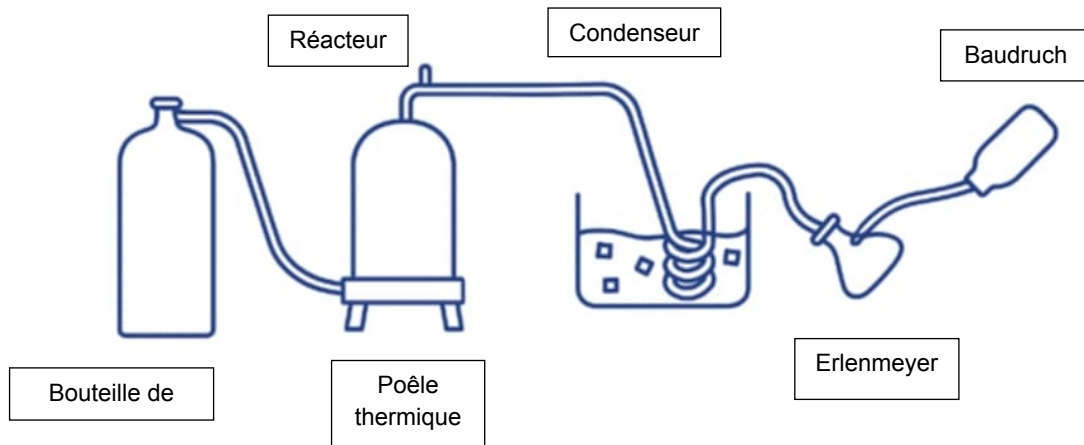


Figure III.8 : Schéma de l'expérience de recyclage du plastique

III.4. Préparation des échantillons

- Découpage : les plastiques sont découpés en petits morceaux (2 à 3 cm²) pour faciliter la pyrolyse.



Figure III.9 : Déchets de plastique déchiquetés.

- Pesée : Une masse définie de plastique (600 g) est pesée et introduite dans le réacteur.

Photo de balance et le plastique quand on le pèse.

III.5. Protocole expérimental de la pyrolyse

Étape 1 : mise en place du réacteur

- introduire les plastiques découpés dans le réacteur.
- Fermer hermétiquement le réacteur en s'assurant que la valve de sécurité est fonctionnelle.
- Raccorder la sortie de vapeur à un système de condensation (serpentin refroidi



dans l'eau).

Figure III.10 : pyrolyseur de plastique

Étape 2 : chauffage.

- Placée le réacteur sur une poêle thermique à une température de 400 °C.
- Le processus de pyrolyse commence généralement à 300 °C.
- Maintenir la température pendant environ 30 à 45 minutes.

Étape 3 : récupération des produits. + les photos

- Les vapeurs formées traversent le condenseur et se transforme en liquide.
- Les gaz non condensables passent par une deuxième ouverture dans la fiole conique.

- Lorsque la réaction est terminée, éteignez le brûleur.
- Laissez le réacteur refroidir avant de l'ouvrir.
- Récupération des résidus solides.

III.6. Sécurité et précautions

- Toujours effectuer l'expérience en milieu ventilé.
- Vérifier l'étanchéité du système avant chaque utilisation.
- Utiliser des équipements de protection individuelle.

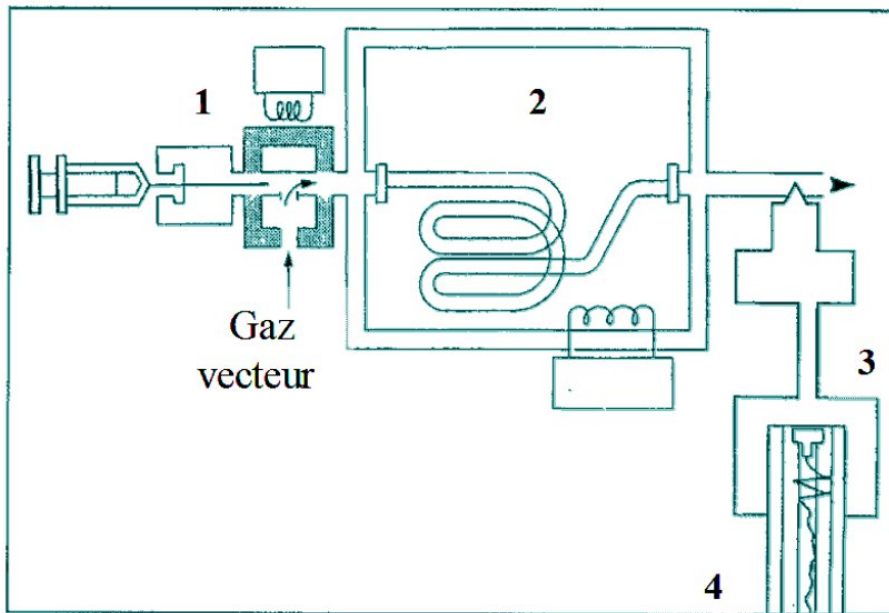
III.7. Les méthodes d'analyses

III.7.1. La chromatographie en phase gazeuse (CPG)

La chromatographie en phase gazeuse (CPG) s'adresse à la séparation des constituants volatils ou volatilissables. Le mélange gazeux ou liquide est introduit dans le système d'injection, volatilisé s'il y a lieu puis entraîné par un gaz vecteur (phase mobile).

Selon leur affinité par rapport à la phase stationnaire, les constituants vont se séparer les uns des autres le long de la colonne, suivant une suite continue d'équilibres s'établissant entre le soluté et la phase stationnaire (liquide ou solide placée à l'intérieur de la colonne).

La colonne est placée dans un four thermostaté. C'est un tube de faible section, enroulé sur lui-même et contenant la phase stationnaire. Au bout de la colonne est placé un détecteur qui permet l'analyse sélective et parfois l'identification des



mélanges [36].

Figure III.11 : Schéma simplifié des composants de la CPG [36].

III.7.2. Point d'éclair

Pour évaluer ce point d'éclair, il suffit de placer une quantité déterminée de liquide dans un récipient à une température inférieure au point d'éclair. En chauffant lentement, on place une flamme à la surface du liquide. Le point d'éclair est atteint dès l'apparition d'un éclair à la surface du liquide. La température devient alors une référence pour classer le produit dans une classe de danger et dans un groupe d'emballage. Généralement effectués dans un récipient ouvert, les essais peuvent également être réalisés dans un récipient fermé [37].



Figure III.12 : Points d'éclair [37].

III.7.3. Le point d'aniline

Le point d'aniline d'un solvant est définie comme la température minimale à laquelle des volumes égaux d'aniline ($C_6H_5NH_2$) et du solvant sont miscibles, c'est-à-dire forment une seule phase lors du mélange.

La valeur donne une approximation de la teneur en composés aromatiques dans le solvant, car la miscibilité de l'aniline, qui est également un composé aromatique, suggère la présence de composés similaires (c'est-à-dire aromatiques) dans le solvant. Plus le point d'aniline est bas, plus la teneur en composés aromatiques du solvant est grande.

Le point d'aniline sert d'approximation raisonnable de l'aromaticité des solvants constituées principalement d'hydrocarbures saturés (par exemple, les alcanes, les paraffines) ou de composés insaturés (principalement des aromatiques). Une fonctionnalisation chimique importante du solvant (chloration, sulfonation, etc.) peut interférer avec la mesure, en raison des modifications de la solvabilité du solvant fonctionnalisé [38].



Figure III.13 : Point d'aniline [39].

III.7.4. La viscosité

Elle consiste à calculer le temps d'écoulement d'un liquide à une certaine température dans un petit récipient. L'instrument qui sert à mesurer la viscosité des fluides est un viscosimètre. On mesure le temps qu'il faut pour un fluide à se déplacer sur une distance particulière à travers un tube ou le temps pris pour un objet avec une taille et une densité donnée de tomber à travers le liquide d'intérêt [37].



Figure III.14 : Le viscosimètre [37].

III.8. Résultats et discussions

III.8.1. Le gaz de la pyrolyse

Pour la phase gazeuse récupérée (Figure III.3), on a effectué une séparation en utilisant la chromatographie en phase gazeuse pour montrer que la phase gazeuse est un mélange d'hydrocarbures. On a effectué la séparation l'échantillon qu'on a obtenue le 29 Mai 2025 :

- La quantité de la matière première utiliser c'était 600 g.
- Le gaz a commencé à sortir après 10-15 min avec une odeur distincte.



Figure III.15 : Le gaz produit de la pyrolyse

Le tableau III.1 montre les résultats de la séparation pour les 02 échantillons avec une comparaison des résultats de la littérature :

Tableau III.1 : Résultats de la chromatographie des deux échantillons

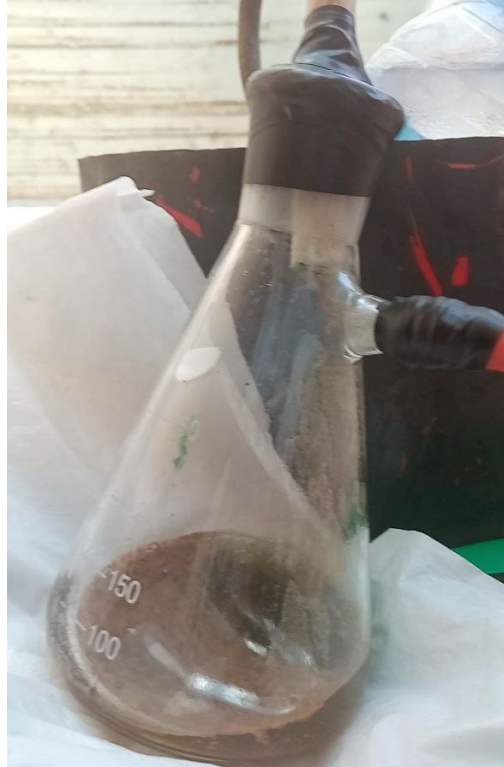
Produits	Fraction	Littérature (Pyrolyse non catalytique) [37]
N ₂	46.073471	-
CO ₂	52.322270	-
Méthane	0.960994	0.072
Ethane	-	0.074
Propane	0.036225	0.11
N-Butane	-	0.003
Iso Butane	0.027103	0.004
N-Pentane	0.012731	-
C ₆ +	0.567206	-

- D'après ces résultats on a remarqué que :
 - Dominance de CO₂ (52.32%) et N₂ (46.07%)
 - Présence notable de méthane (0.96%)
 - Hydrocarbures divers détectés (propane, butane, pentane)
- La variabilité des résultats peut s'expliquer par plusieurs facteurs :
 - **Conditions opératoires** :
 - Température potentiellement inadaptée
 - Possibilité de fuites dans le système
 - **Nature des plastiques** :
 - Hétérogénéité des polymères dans les bouteilles
 - Présence éventuelle d'additifs ou d'impuretés
- La présence majoritaire de N₂ dans l'échantillons suggère :
 - Une contamination atmosphérique pendant le processus
 - Un dégazage incomplet avant l'expérience
 - Un possible entré d'air pendant l'échantillonnage

- Les hydrocarbures détectés dans l'échantillon 1 confirment :
 - La dépolymérisation thermique des matières plastiques
 - La formation de composés énergétiques valorisables
 - L'efficacité partielle du procédé
- Pour améliorer la qualité du biogaz produit, plusieurs pistes sont envisageables :
 1. Contrôle strict de l'anaérobiose
 2. Augmentation du temps de réaction
 3. Caractérisation précise de la matière première
 4. Implémentation de catalyseurs appropriés
- **Interprétation de la comparaison entre notre étude et l'étude de la littérature :**
 - Notre expérience génère **plus de méthane** mais aussi beaucoup de CO₂/N₂, indiquant une **oxydation partielle** ou des fuites d'air.
 - La littérature rapporte plus d'éthane/propane, suggérant un craquage thermique mieux contrôlé due à la température ou durée suffisante pour un craquage complet.

III.8.2 Le liquide de la pyrolyse

On a récupéré une quantité environ 200 ml de liquide avec une forte odeur ce qui nous montre que le liquide contient des aromatiques, une série des tests devra être menées pour ces produits, comme la viscosité, point d'éclair, point d'inflammation et d'autres analyses



élémentaires permettent de déterminer le pourcentage massique, principalement, de carbone, d'hydrogène présent dans la solution.

Figure III.16 : Le liquide récupéré de la pyrolyse

La même littérature précédente [37] des étudiants dans notre université (2021) indique que les compositions des liquides obtenus par pyrolyse non catalytique de PET, PE et PVC sont représentées dans la Figure III.13 On peut remarquer que les hydrocarbures dérivés de la pyrolyse non catalytique sont constitués d'une large gamme de chaînes carbonées (C6-C8) dans le liquide obtenu à 200°C avec une petite différence pour le liquide obtenu à 250°C.

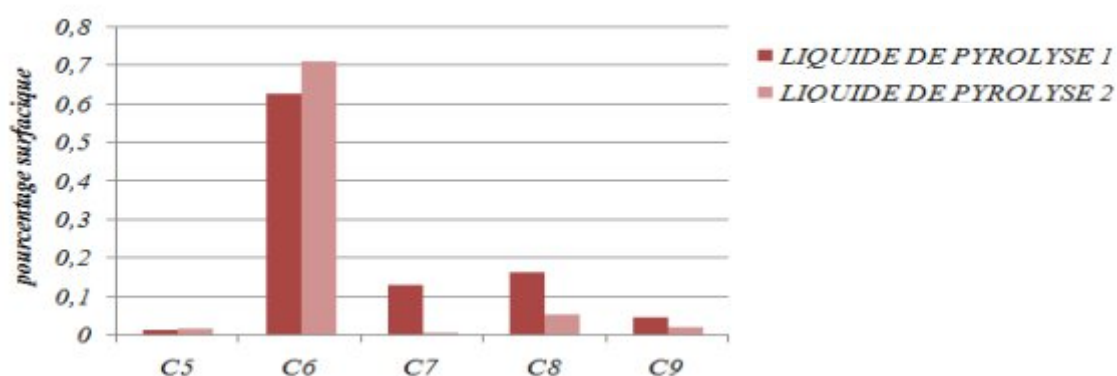


Figure III.17 : Distribution de nombre de carbone des liquides dérivés de la pyrolyse non catalytique [37].

On note qu'on peut avoir des hydrocarbures à plus de C8 ; on arrive même à C9-C21 mais dû à la quantité récupérée des phases liquides et gazeuses de la pyrolyse ce qui conduit à des analyses qui ne sont pas complètes [37].

Le tableau III.2 présente la répartition des aromatiques contenus dans le liquide obtenu à partir de la pyrolyse non catalytique du PET, PVC et du PE :

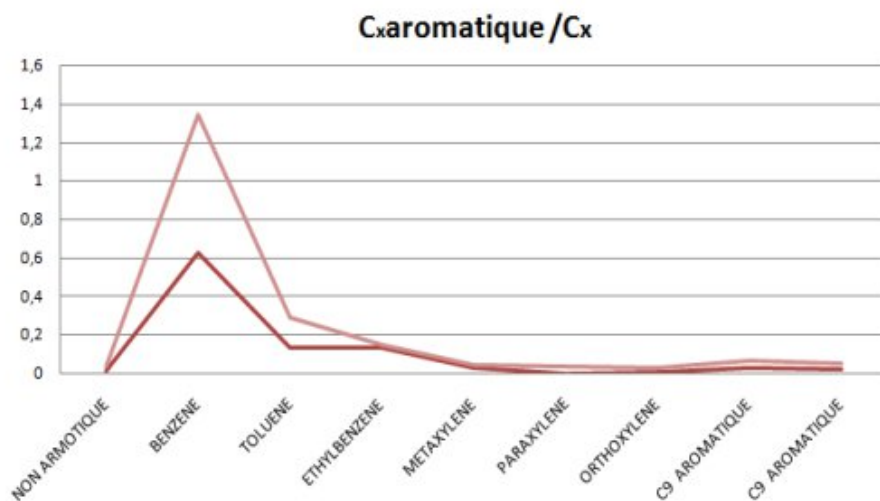
Tableau III.2 : distribution des aromatiques contenus dans les liquides de pyrolyse

PRODUITS	Cxaromatique/Cx	Cxaromatique/Cx2
NON ARMOTIQUE	1,575029	1,792749
BENZENE	62,670305	71,33338
TOLUENE	13,249753	15,0813
ETHYLBENZENE	13,613932	0,674047
METAXYLENE	2,899613	1,011824
PARAXYLENE		3,287132
ORTHOXYLENE	1,107402	1,260481
C9 AROMATIQUE	2,817794	3,207305
C9 AROMATIQUE	2,066171	2,351783

Figure III. 18 : Distribution des aromatiques contenus dans le liquide de pyrolyse [37].

Les produits issus de la pyrolyse des matières plastique sont principalement des hydrocarbures liquides et gazeux. Les liquides peuvent être soit brûlés pour la production de chaleur, soit subir un raffinage supplémentaire pour produire des carburants de haute qualité. A partir de la fraction liquide, on peut récupérer des hydrocarbures dans la gamme de l'essence (C4-C12), du kérosène (C10-C18), du diesel (C12-C23), et d'huile moteur (C23-C40) (Almeida and Marque, 2015). Les gaz peuvent être liquéfiés sous forme de carburants ou utilisés comme combustibles pour chauffer le réacteur de pyrolyse [37].

Cepeliogullar et Putun ont étudié la pyrolyse du PET pour produire de l'huile dans un réacteur fixe à environ 500 °C. Lors de cette expérience, le taux de chauffage était d'environ 10 °C/min, avec un gaz de balayage, l'azote. La production d'huile était significativement



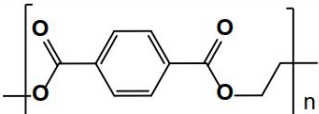
inférieure à celle du produit gazeux. Le taux d'huile récupéré était de 23,1 % en poids, tandis que le produit gazeux était de 76,9 % en poids, sans aucun résidu solide. Le tableau II.3 illustre le faible rendement liquide basé sur l'analyse immédiate ; il révèle également une diminution d'environ 86,83 % des constituants volatils du PET par rapport aux autres plastiques, mais la teneur en composés instables est généralement supérieure à 90 % [23].

La teneur en matières volatiles de chaque plastique est très élevée et sa teneur en cendres est considérablement faible, ce qui en fait de bons candidats pour une production importante de pétrole par pyrolyse [23].

Fakhrhoseini et Dastanian [40], quant à eux, ont découvert qu'une quantité significativement plus importante de liquide pétrolier était produite à des vitesses de chauffage et des températures de fonctionnement très similaires [23].

Le rendement en huile liquide était de 39,89 % en poids, le rendement en vapeur de 52,13 % en poids et la teneur en précipité solide de 8,98 % en poids. En conséquence, le rendement en huile liquide du PET pyrolysé était compris entre 23 et 40 % en poids, tandis que le rendement en vapeur était compris entre 52 et 77 % en poids. D'après ces résultats, le polyéthylène téréphtalate pourrait être le polymère le plus adapté à la pyrolyse si l'on privilégie les produits gazeux, par exemple pour fournir l'énergie nécessaire au maintien du récipient à la température optimale [23].

Tableau III.3 : Résultats de la pyrolyse de PET [41,42].

Plastic types	Backbone	Fixed carbon (in wt%)	Moisture (in wt%)	Ash (in wt%)	Volatile (in wt%)
Polyethylene terephthalate (PET)		7.77 13.17	0.46 0.61	0.02 0.00	91.75 86.83

III.9. Conclusion

Les résultats analytiques ont mis en évidence une production principalement gazeuse qu'on peut l'utiliser comme un combustible pour augmenter la température due à la présence du méthane (0.96%). Les tests réalisés sur l'échantillon liquide ont permis de caractériser plusieurs propriétés clés :

- **Point d'éclair** : La mesure correspond à la température ambiante, ce qui indique une sensibilité aux conditions environnementales. Cette donnée est importante pour évaluer les précautions à prendre lors de son stockage ou de sa manipulation.
- **Point d'aniline** : Les essais normalisés concernant le point d'aniline correspond à la possibilité de séparer les phases après le chauffage du mélange (aniline + phase liquide) ont donné un mélange trouble qui n'a pas été séparé (séparation distinguée et impossible). Une seule phase homogène s'est formée, suggérant une réaction chimique irréversible entre les réactifs. Ce comportement pourrait limiter certaines applications où une compatibilité avec les amines aromatiques est requise.
- **Viscosité cinématique** : La valeur obtenue est proche de 1, confirme une faible viscosité, ce qui peut être un avantage pour des utilisations nécessitant une bonne fluidité.

Conclusion générale

Ce projet s'inscrit dans une perspective de lutte contre la pollution causée par les plastiques, en explorant une approche différente du recyclage traditionnel. Il cible en particulier les résidus plastiques qui ne peuvent être pris en charge par les procédés mécaniques habituels. Pour cela, la pyrolyse est analysée en tant que méthode de valorisation thermique, permettant de convertir ces déchets en produits à plus forte valeur ajoutée.

L'expérimentation en laboratoire a consisté à traiter ces déchets de PET par la pyrolyse dans un réacteur fermé montage schématisé (page 48) milieu inerte, les résultats obtenus et observés ont mis en évidence : une production principalement d'une phase gazeuse, dont les composants majeurs sont le diazote (N_2) à 46,07 % et le dioxyde de carbone (CO_2) à 52,32 %. On y consiste également la présence des traces de méthane (0,96 %), de propane (0,036 %), d'isobutane (0,027 %), de n-pentane (0,012 %) et d'hydrocarbures lourds (C_6+) de 0,56 %. On a remarqué aussi une forte odeur d'après des études et des recherches, cette odeur est due à la production d'une huile pyrolytique riche en aromatique avec un point d'éclair égale à la température ambiante. Le test du point d'aniline trouble (impossible de faire la séparation entre l'aniline et l'échantillon de formation constituant d'une seule phase après le chauffage à une réaction irréversible avec une faible viscosité cinématique.

Les recommandations pour réaliser un bon procédé de pyrolyse dans des meilleurs conditions tels que ;

- Modifier le tube serpentin pour améliorer le cycle de refroidissement
- Effectué un nettoyage chimique avec le HCL après chaque expérience pour dissoudre les résidus et avoir un bon rendement.
- Ajouter un thermomètre et un manomètre pour contrôler la température et la pression
- Voir la possibilité d'ajouter un catalyseur pour avoir une pyrolyse rapide avec une bonne qualité des produits
- Le nettoyage et le séchage des déchets plastique avant l'utiliser dans la pyrolyse avec l'acétone

Les références

- [1] : Plastics Europe : Plastics-the Facts 2013. An Analysis of European Latest Plastics Production, Demand and Waste Data. 2013.
- [2] : Zhou C, Fang W, Xu W, and Cao A, Wang R : Characteristics and the recovery potential of plastic wastes obtained from landfill mining. J. Clean. Prod.2014, 80 : 80-86.
- [3] : Papong S, Malakul P, Trungkavashirakun R, Wenunun P, Chom-in T, Nithitanakul M: Comparative assessment of the environmental profile of PLA and PET drinking water bottles from a life cycle perspective. J. Clean. Prod 2014, 65 : 539-550.
- [4] : Badia JD, Stromberg E, Karlssonb S, Ribes-Greus A : The role of rystalline, mobile amorphous and rigid amorphous fractions in the performance of recycled poly (ethylene terephthalate) (PET). Polym. Degrad. Stab 2012, 97: 98-107.
- [5] : NAILI, A. (2020). Effet du traitement des granulats plastiques et le type de sable sur les caractéristiques du mortier. Mémoire de Master en Génie Civil, Université Mohamed Khider de Biskra
- [6] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Monom%C3%A8re> le 03/03/2025 a 17 :15
- [7] : REZGUI.R & REZGUI.DJ. (2019). Influence des fibres naturelles sur les propriétés mécaniques et dynamiques des composites à base de PVC (cas DPLF-noix d'olives). MÉMOIRE DE MASTER en Physique des matériaux. Université Mohamed Khider de Biskra
- [8] : M. Tayab, Cours Enseignement secondaire « Haba Abade Majid ».
- [9] : G.W. Ehrenstein, F. Montage, « Matériaux polymères, structures, propriétés et applications », Hermés. Paris 2000
- [10] : H, Boureghda, Mémoire de magister r « Etude de l'influence de la mise en forme sur la cristallisation et les propriétés physiques des polymères », Université Hadj Lakhdar- Batna ,2006.

[11] : Dr. Rafik BENRABAA, Cinétique & Polymères, Département de Pétrochimie, Faculté de Technologie Université de 20 Août 1955-Skikda & Laboratoire de Matériaux Catalytiques et Catalyse en Chimie Organique-USTHB-Alger

[12] : HADJ, R. DJOULAH, M. (2023), Valorisation des déchets plastiques pour la fabrication de fuel, Mémoire Master, Chimie, Chimies des produits naturels, Université Echahid Larbi Tebessi – Tebessa.

[13] : RAMDANI, R. KHETALA, C. (2020) Valorisation des déchets inorganiques via la récupération des fractions énergétiques utilisant des procédés de séparation innovant, Mémoire Master Recherche : Industries Pétrochimiques, Génie pétrochimique, Université de 20 Aout 1955 SKIKDA.

[14] : Wikipédia. La polymérisation [En ligne] (Consultée le : 04/04/2025)

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Polym%C3%A9risation>

[15] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Pollution_par_le_plastique le 01/04/2025

[16] : <https://www.conservation-nature.fr/ecologie/la-pollution-plastique/> le 02/04/2025

[17] : <https://institut-superieur-environnement.com/blog/impact-du-plastique-sur-lenvironnement-un-fleau-planetaire/> le 02/04/2025

[18] : <https://institut-superieur-environnement.com/blog/impact-du-plastique-sur-lenvironnement-un-fleau-planetaire/> le 02/04/2025

[19] : MEFTAH, A. RAZALI, A. Synthèse de nouveaux matériaux à partir du recyclage des déchets plastiques, Mémoire Master, Chimie, Chimie appliquée, Université ABDELHAMID IBN BADIS – MOSTAGANEM.

[20] : DAHOU, M. KADDOUR, O. HADJ, M. Valorisation des déchets plastiques à valeur énergétique, Conférence : Première Conférence Nationale sur La Protection de l'Environnement et les Energies Renouvelables CNPER1-18, At : Batna, Algeria, Consulté le : Lundi 14 octobre 2024.

[21] : IFPEN. Recyclage des plastiques. [En ligne] Consulté le : 20/06/2025 à 21:24

<https://view.genially.com/6040ed8945e4040d2f0a03c1/interactive-content-recyclage-des-plastiques>

[22] : Canard plastique. Recyclage du plastique : processus, défis et avancée technologie [En ligne]. (Consultée le : 04/04/2025)

<https://www.canardplastique.fr/materiaux/recyclage-du-plastique-processus-defis-et-avancees-technologiques/>

[23] : Vadiraj, K. T., Tom, A. K., E, S., S, Y., Achar, R. R., Pyrolysis of plastic waste to plastic oil: A future source of fuel-Review, J.sustain. dev. energy water environ. syst., 13(1), 1130545, 2025, DOI: <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d13.0545>

[24] : Renovable.blog. Les défis du recyclage du plastique. [En ligne] (Consultée le : 04/04/2025)

https://renovables.blog/fr/recyclage/plastique/les-proc%C3%A9d%C3%A9s-de-recyclage-du-plastique-et-leur-importance/#desafios_del_reciclaje_del_plastico

[25] : Fivga A, Dimitriou I, Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel Substitute : A techno-economic assessment, *Energy* (2018), doi : 10.1016/j.energy.2018.02.094.

[26] : Guenouai, S. et Gherbi, A. (2018). Contribution à la valorisation des déchets en Algérie. Mémoire Master Recherche : Génie Mécanique, Énergétique, Université KASDI MERBAH OUARGLA, Le 11/06/2018

[27] : Lopez, A., de Marco, I., Caballero, B.M., Laresgoiti, M.F., Adrados, A., 2011. Influence of time and temperature on pyrolysis of plastic wastes in a semibatch reactor. *Chem. Eng. J.* 173, 62–71.

[28] : Hernández, M. del R., Gómez, A., García, Á.N., Agulló, J., Marcilla, A., 2007. Effect of the temperature in the nature and extension of the primary and secondary reactions in the thermal and HZSM-5 catalytic pyrolysis of HDPE. *Appl. Catal. A Gen.* 317, 183–194.
Hernández, M.D.R., García, Á.N., Gómez, A., Agulló, J., Marcilla, A., 2006. Effect of residence time on volatile products obtained in the HDPE pyrolysis in the presence and absence of HZSM-5. *Ind. Eng. Chem. Res.* 45, 8770–8778.

- [29] : Mastral, F., Esperanza, E., García, P., Juste, M., 2002. Pyrolysis of high-density polyethylene in a fluidised bed reactor. Influence of the temperature and residence time. J. Anal. Appl. Pyrolysis 63, 1–15.
- [30] : Chantal Kassargy. Contribution à l'étude de la valorisation énergétique des résidus de plastique par craquage catalytique. Génie des procédés. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique ; École doctorale des Sciences et de Technologie (Beyrouth), 2018. Français. FfNNT : 2018IMTA0077ff. Fftel-01883636.
- [31] : <https://fr.kindle-tech.com/faqs/what-type-of-plastic-is-best-for-pyrolysis> le 10/03/2025 à 20 :15
- [32] : <https://www.artis-groupe.fr/blog/pyrolyse-methane> le 13/03/2025 à 21:05
- [33]: [https://fr.kindle-tech.com/faqs/what-are-the-main-products-formed-from-the-pyrolysis-process#:~:text=Les%20principaux%20produits%20de%20la%20pyrolyse%20compr%20des%20r%C3%A9sidus%20solides,condensables%20\(gaz%20de%20synth%C3%A8se\).](https://fr.kindle-tech.com/faqs/what-are-the-main-products-formed-from-the-pyrolysis-process#:~:text=Les%20principaux%20produits%20de%20la%20pyrolyse%20compr%20des%20r%C3%A9sidus%20solides,condensables%20(gaz%20de%20synth%C3%A8se).) Le 11/03/2025 à 20 :05
- [34] : HASSIBI, N. (2024). Étude de la pyrolyse de déchets plastiques : essais et modélisation, Université de Lorraine.
- [35] : <https://fr.kindle-tech.com/faqs/is-plastic-pyrolysis-eco-friendly> le 10/04/2025 à 20 :05
- [36] : <https://chimieanalytique.com/chromatographie-en-phase-gazeuse-cpg/> Consulté le 01/07/2025 à 17:26
- [37] : KABACHE, N. KORICHI, M. (2021) Synthèse d'un carburant à partir des déchets plastiques, Mémoire Master Recherche : Industries Pétrochimiques, Génie pétrochimique, Univerité de 20 Aout 1955 SKIKDA.
- [38] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Point_d%27aniline consulté le 01/07/2025 à 17 32
- [39] : <https://www.tanaka-sci.com/en/products/aap-6/> Consulté le 01/07/2025 le 17:49
- [40] : S. M. Fakhrhoseini and M. Dastanian, "Predicting pyrolysis products of PE, PP, and PET using NRTL activity coefficient model," J Chem, 2013, <https://doi.org/10.1155/2013/487676>.

[41] : F. W. Mader, "Plastics waste management in Europe," *Makromolekulare Chemie*.

Macromolecular Symposia, vol. 57, no. 1, pp. 15–31, May 1992,

<https://doi.org/10.1002/MASY.19920570104>.

[42] : J. M. Heikkinen, J. C. Hordijk, W. De Jong, and H. Spliethoff, "Thermogravimetry as a tool to classify waste components to be used for energy generation," *J Anal Appl*

Pyrolysis, vol. 71, no. 2, pp. 883–900, Jun. 2004,

<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2003.12.001>.