



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
Et de la Recherche scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie



Mémoire de Fin d'Étude en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Industries Pétrochimiques

Spécialité : Génie Pétrochimique

Thème

Les oléfines et leurs utilisations pour
la production des matières plastiques
(Étude théorique)

Présenté par :

-  Hafouda Nasrellah
-  Beladjal El hachemi
-  Belmostefa Ali
-  Chetti Mohamed Elhadi
-  Mehda Elmohaleb

Devant le jury composé de :

- | | | |
|--|-----------|----------------------|
|  Mr. Rouahna Nouredine | Président | Université d'El Oued |
|  Mr. Bilal Khaled | Examineur | Université d'El Oued |
|  Mr. Abdeslam Boughezal | Encadreur | Université d'El Oued |

Année universitaire : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَمِنْ آيَاتِهِ أَنْ يُمْسِكَ
الْجِبَالَ غَابًا مَنَازِلَ
لَهُ يَوْمَ الْقِيَامَةِ يَوْمَ
يَبْقَى الْمَوْجِدُ أَلَمًا
لِلْكَافِرِينَ

Remerciements

*Avant tout, nous exprimons notre gratitude à Dieu, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la santé, le courage et la patience pour mener à bien ce modeste travail. Nous tenons à remercier chaleureusement notre superviseur, Monsieur **Boughezal Abdeslam**, pour son accompagnement tout au long de cette étude. Sa disponibilité constante et ses conseils éclairés ont grandement contribué à sa réalisation.*

Nous souhaitons également remercier tous les enseignants qui nous ont accompagnés durant notre parcours d'études, et qui ont joué un rôle essentiel dans notre formation.

Nous adressons nos remerciements à tous nos amis, sans exception, ainsi qu'à nos collègues du département. Leur soutien et leurs encouragements ont été précieux tout au long de cette aventure.

Nous espérons que les membres du jury reconnaîtront notre profond respect à travers ces mots, témoignant de l'appréciation que nous avons pour le temps et les efforts qu'ils ont consacrés à l'examen de ce mémoire.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers toutes les personnes qui ont directement ou indirectement contribué à la réalisation de cette étude. Leur participation a été d'une importance capitale.

Merci à tous.

A decorative rectangular frame with ornate, symmetrical scrollwork and flourishes at the corners and midpoints of the sides, enclosing the central text.

Résumé

ملخص:

يتمحور هذا البحث حول أهمية المواد البتروكيمياوية المعروفة باسم الأوليفينات في مجال صناعة المواد البلاستيكية، حيث يتركز هذا البحث على إستعراض الطرق والعمليات الصناعية الأساسية المستخدمة في إنتاج الأوليفينات، مثل الإيثان والنفثا، عن طريق عمليات تقطير البترول ، ومن ثم يتم التطرق إلى العملية المهمة للتكسير بالبخار، الذي يحول المواد الأولية المتمثلة في الغاز الطبيعي و النفثا إلى أوليفينات، وهي في الواقع مونمرات سيتم تحويلها فيما بعد إلى بوليميرات، كالبولي إيثيلان والبولي بروبيلان عن طريق عمليات البلمرة المختلفة ، مما يجعلها تلعب دورًا هامًا في الاقتصاد العالمي.

تُعد الأوليفينات المكوّن الأساسي للبوليميرات، إذ يتم تحويلها من وحدات أحادية المكون (مونومرات) إلى سلاسل مترابطة أكبر (بوليميرات)، مثل البولي إيثيلين والبولي بروبيلين. تجد هذه المواد استخدامات متعددة في تصنيع العديد من المنتجات، بما في ذلك الأغلفة البلاستيكية، والألياف الاصطناعية، والمنظفات.

من خلال هذا البحث، نتيح لأنفسنا فهمًا أعمق لأهمية الأوليفينات كمكون رئيسي في صناعة المواد البلاستيكية والتأثيرات الاقتصادية التي ترتبط بهذا القطاع. يتجلى دور التطورات المستمرة في صناعة المركبات البتروكيمياوية في الإسهام في الاقتصاد العالمي وتطوير الصناعات ذات الصلة.

الكلمات المفتاحية: المواد البلاستيكية، الأوليفينات، التكسير بالبخار، البلمرة، البيئة.

RESUME :

Cette étude se concentre sur l'importance des produits pétrochimiques appelés oléfines dans l'industrie des matières plastiques. Elle met en avant les méthodes et les procédés industriels essentiels pour produire ces oléfines, telles que la séparation de l'éthane et du naphta par distillation du pétrole brut. Parmi ces procédés, le craquage à la vapeur d'eau ou vapocraquage, qui permet la transformation d'une partie du naphta pétrochimique ou du gaz naturel en produit oléfiniques. Ces composés (oléfines) sont, en réalité, des monomères qui vont être transformés par la suite en polymères (Polyéthylène, Polypropylène...) par différents procédés de polymérisation.

Les oléfines sont des matières premières clés pour la création de polymères, passant des monomères aux polymères tels que le polyéthylène et le polypropylène. Ces matières sont employées dans la production d'une multitude d'articles, notamment des emballages plastiques, des fibres synthétiques et des produits d'entretien.

Ce travail met en lumière l'importance fondamentale des oléfines dans l'industrie des matières plastiques, tout en enrichissant la compréhension des procédés de fabrication et de leurs retombées économiques. L'évolution constante de l'industrie des composés pétrochimiques souligne leur rôle crucial dans l'économie mondiale et le développement des industries associées.

Mots clés : Matières plastiques, oléfines, vapocraquage, polymérisation, environnement.



SOMMAIRE

SOMMAIRE

Remerciements

Résumé

Introduction générale..... 01

Chapitre I : Les hydrocarbures oléfiniques

I-1 Historique des hydrocarbures oléfiniques	02
I-2 Définition.....	02
I-3-Classification des hydrocarbures oléfiniques.....	03
I-3-1 Alcènes linéaires	03
I-3-2 Alcènes ramifiés	05
I-3-3 Les Diènes	07
I-3-4 Alcènes cycliques	07
I-3-5 Alcènes fonctionnalisés	08
I- 4 Procédés d'obtention des oléfines	09
I- 4-1 Vapocraquage (Steam cracking)	10
a)-Historique	10
b)-Définition de Vapocraquage	10
c)- Principe de fonctionnement	11
d)- Description du Procédé de Vapocraquage	12
e)- Conditions opératoires	14
I- 4-2 Craquage catalytique	15
a)- Définition	15
b)- Description de procédé	15
c)- Conditions opératoires	16
I- 4-3 Procédé MTO (Méthanol-to-Olefins)	16
a) - Définition	16
b)- Description de procédé	16
I- 4-4 Procédé de déshydrogénation	17
a)- Définition de procédé	17
b)- Description de procédé	18

SOMMAIRE

I- 5 Les oléfines dans la pétrochimie	18
I-5-1 L'importance des oléfines	18
I-5-2 Valorisation des oléfines	19
I- 6 Caractéristiques des oléfines	20
I- 7 Les domaines d'utilisation des oléfines	21

Chapitre II : Les polyoléfines

II-1 Historique des polyoléfines	24
II-2 Définition des polyoléfines	24
II-3 Types des polyoléfines	24
II-4 Généralités sur les procédés de polymérisation	25
II-4-1 Définition de polymérisation	25
II-4-2 Réaction de polymérisation	25
II-4-2-1 Polymérisation par addition (en chaîne)	25
II-4-2-2 Polymérisation par condensation (par étape)	27
II-4-3 Mécanisme réactionnel des procédés de polymérisation	27
II-4-3-1 Mécanisme réactionnel de polymérisation en chaîne	27
a)- Polymérisation radicalaire	27
b)- Polymérisation ionique	29
c)- Polymérisation par coordination	29
II-4-3-2 Mécanisme réactionnel de polymérisation par étape	30
a)- Polymérisation par ouverture de cycle	30
b)- Polymérisation par ouverture de groupes fonctionnels	30
II-4-4 Procédés de Polymérisation	30
II-4-4-1 Procédé en masse	30
II-4-4-2 Procédé en solution	31
II-4-4-3 Procédé en émulsion	31
II-4-4-4 Procédé en suspension	31
II-5 Les grandes catégories des polyoléfines	32
II-5-1 Polyéthylène (PE)	32
a)- Structure de polyéthylène	32
b)- Types de polyéthylène	33

SOMMAIRE

c)- Propriétés de polyéthylène	34
II-5-2 Polypropylène (PP)	35
a)- Structure de polypropylène	35
b)- Types de polypropylène	37
c)- Propriétés de polypropylène	39
II-5-3 Polybutadiène	40
a)- Structure de polybutadiène	40
b)-Types de polybutadiène	41
c)- Propriétés de polybutadiène	42

Chapitre III :

Mise En Œuvre, Application Et Recyclage Des Polyoléfines

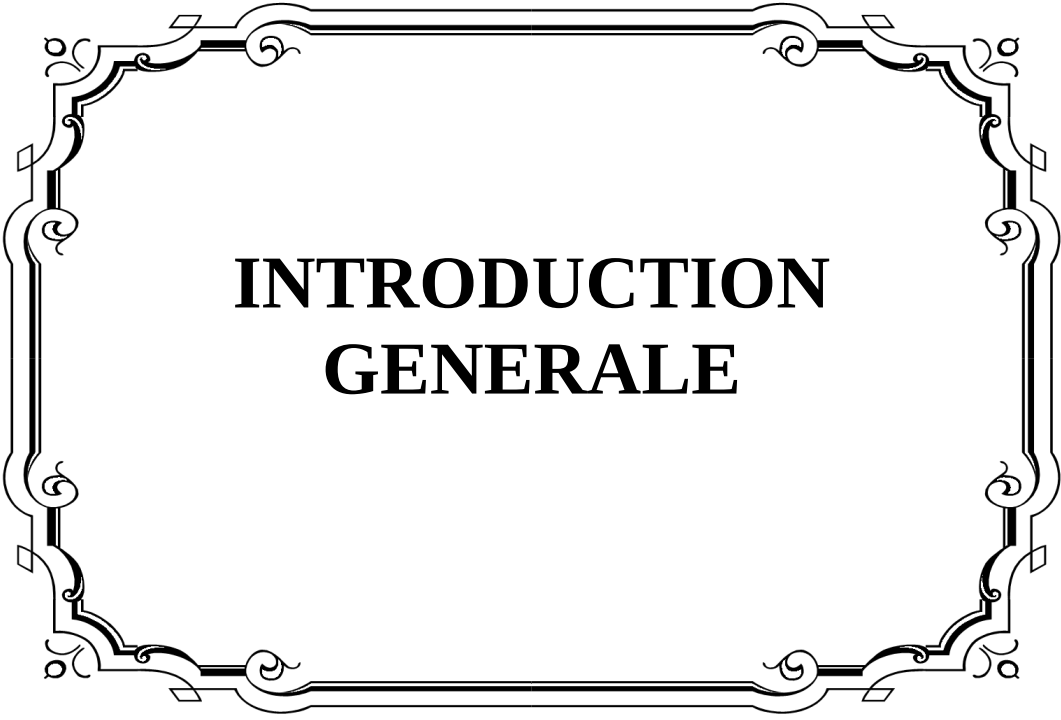
III-1 Procédés de mise en œuvre des polyoléfines	45
III-1-1 Extrusion	45
III-1-2 Moulage par injection	45
III-1-3 Soufflage de films	46
III-1-4 Thermoformage.....	47
III-1-5 Soudage	48
III-1-6 Impression	48
III-2 Statistiques sur les domaines d'application des polyoléfines	49
III-2-1 Statistiques sur la production et la consommation des polyoléfines	51
III-2-2 Répartition géographique	52
III-3 Recyclage des polyoléfines	53
III-3-1 Effets des polyoléfines sur l'environnement	54
III-3-2 Types de recyclage des polyoléfines	56
a)- Recyclage mécanique	56
b)- Recyclage chimique	57
c)- Recyclage énergétique	57
d)- Recyclage en boucle fermée	57
III-3-3 Statistiques sur le recyclage des polyoléfines	58
Conclusion Générale	59
Références bibliographiques	60

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Liste des figures	page
Chapitre I	
Figure I.1: Exemple d'un Vapocraqueur industriel	11
Figure I.2 : Schéma simplifié de vapocraquage d'Ethane	12
Figure I.3: Schéma explicative d'un procédé de vapocraquage	13
Figure I.4: Schéma de Principe de craquage catalytique	16
Figure I-5: Procédé MTO (Méthanol-to-Olefins)	17
Figure I.6: Quelques exemples de domaine d'application des oléfines	23
Chapitre II	
Figure II-1: Voies, types et procédés de polymérisation	26
Figure II.2: Polymérisation radicalaire	28
Figure II-3: Polymérisation Anionique d'oxyde d'éthylène	29
Figure II-4: polymérisation en émulsion	31
Figure II-5: polymérisation en suspension (production du PVC)	32
Figure II-6: Différentes formes de polyéthylène	33
Figure II-7: Les principales structures tactiques du polypropylène	36
Figure II-8: Polypropylène homopolymère (PP-H)	37
Figure II-9: Polypropylène copolymère (PP-C)	38
Figure II-10: Polypropylène aléatoire (PP-R)	38
Figure II-11: Polypropylène à impact élevé (PP-HE)	39
Figure II-12: Schéma illustratif des différents procédés du pétrole au plastique	44
Chapitre III	
Figure III-1 : Procédé d'extrusion des polyoléfines	45
Figure III-2 : Procédé de moulage par injection	46
Figure III-3 : Procédé de soufflage de films	47
Figure III-4 : Procédé de Thermoformage	48
Figure III-5 : Applications des polyoléfines dans le domaine de l'emballage	50
Figure III-6 : Demande européenne des polymères	51
Figure III-7 : Statistique sur les besoins des polyoléfines par les régions du monde 2018	53
Figures III-8 : Impact des plastiques sur les océans (pollution)	55
Figure III-9 : Schéma simplifié de recyclage mécanique des déchets post-consommation	57
Figure III-10 : Taux de recyclage des emballages plastiques en Europe 2016	58

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Liste des tableaux	page
Tableau I.1: Données physico-chimique d'Éthylène	04
Tableau I.2: Données physico-chimique de Propylène	05
Tableau I.3: Données physico-chimique de Butylène	06
Tableau I-4 : Rendement des produits obtenus par vapocraquage selon la charge	10



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les oléfines ou simplement alcènes sont des hydrocarbures insaturés contenant dans leurs structures moléculaires au moins une double liaison carbone-carbone. Ils se considèrent comme des matières de base pour le secteur pétrochimique. Ils sont obtenus essentiellement par vapocraquage ou craquage à la vapeur d'eau (steam cracking) du naphta ou du gaz naturel, la raison pour laquelle, l'unité de vapocraquage est considérée comme l'unité clé, autour de laquelle se greffera le complexe des unités utilisatrices. La présence de la double liaison dans la molécule d'oléfine lui confère des diverses possibilités de réactions chimiques dans la synthèse d'une large gamme de produits et intermédiaires chimiques. Ces caractéristiques font des oléfines, les intermédiaires les plus importants pour la pétrochimie avec des tonnages de production en croissance de l'an à l'autre.

Parmi les secteurs d'utilisations des oléfines, celui des matières plastiques. En fait, les oléfines les plus produites, l'éthylène, le propylène et le butylène, se considèrent comme des monomères qui vont être polymérisés en polymères (polyoléfines) : polyéthylène, polypropylène et le polybutylène respectivement.

Vue la diversité d'applications des oléfines (plastiques, fibres synthétiques, détergents,...etc.), en fait d'eux des matières d'une grande importance économique pour les pays qui détiennent la technologie des transformations chimiques. A ce fait, des complexes pétrochimiques plus modernes s'implantent chaque année et régulièrement à travers le monde.

Le présent mémoire est réparti en trois chapitres, dont le premier est consacré aux hydrocarbures oléfiniques, le deuxième aux polyoléfines et le troisième aux procédés de mise en œuvre, application et recyclage des polyoléfines.

CHAPITRE I
LES HYDROCARBURES
OLEFINIQUES

I-1 Historique des hydrocarbures oléfiniques :

Depuis la découverte de l'éthylène en 1664 par John Ray, suivi de son isolement par Michael Faraday en 1835, les progrès se sont accélérés. "Edward Frankland" a synthétisé le premier dérivé d'éthylène en 1848, et "Hans von Pechmann" a accidentellement découvert un alcène ramifié en 1899.

Les années suivantes ont été marquées par des avancées majeures, notamment la découverte du procédé d'hydrogénation des oléfines par "Walter Reppe" en 1933 et le développement du procédé de polymérisation de l'éthylène à haute pression par "Paul Hogan" et "Paul Banks" en 1953. Les contributions de "Karl Ziegler" et "Giulio Natta" en 1971, qui ont remporté le prix Nobel de chimie. Les hydrocarbures oléfiniques, également connus sous le nom d'oléfinés ou d'alcènes, ont une origine variée. [1]

Ils se forment naturellement à partir de matières organiques décomposées et se trouvent dans les gisements souterrains de pétrole et de gaz naturel. L'extraction de pétrole et de gaz naturel permet de récupérer ces hydrocarbures. De plus, des procédés industriels, tels que le craquage catalytique et le craquage à la vapeur ou vapocraquage sont utilisés pour produire des oléfines à partir de fractions pétrolières lourdes. La synthèse chimique offre également la possibilité de produire des oléfines à partir de réactions de déshydratation, de réarrangement ou de déshydrogénation. Les hydrocarbures oléfiniques sont essentiels dans l'industrie pétrochimique pour la fabrication de plastiques, de fibres synthétiques, de solvants et de carburants

I-2 Définition:

Les hydrocarbures oléfiniques, également appelés alcènes, sont une classe de composés organiques qui contiennent une ou plusieurs liaisons doubles carbone-carbone (C=C) dans leur structure moléculaire. Les alcènes sont des hydrocarbures insaturés car ils contiennent moins d'atomes d'hydrogène que les hydrocarbures saturés correspondants.

La formule générale des hydrocarbures oléfiniques est C_nH_{2n} , où "n" représente le nombre d'atomes de carbone dans la molécule. Par exemple, l'éthylène (C_2H_4) et le propylène (C_3H_6) sont deux exemples courants d'alcènes [2]

Les alcènes sont des composés très réactifs en raison de leur double liaison carbone-carbone, ce qui leur confère des propriétés chimiques distinctes par rapport aux alcanes saturés. Ils peuvent subir

CHAPITRE I : Les Hydrocarbures Oléfiniques

diverses réactions chimiques telles que l'addition d'atomes ou de groupes fonctionnels à la double liaison, la polymérisation pour former des polymères d'éthylène ou de propylène, ainsi que des réactions d'oxydation.

I-3-Classification des hydrocarbures oléfiniques:

Les oléfines peuvent être classées en fonction de la longueur de leur chaîne carbonée, du type de groupe fonctionnel présent et de la disposition des atomes dans la molécule. Voici quelques exemples de classes d'hydrocarbures oléfiniques couramment rencontrés :

I-3-1 Alcènes linéaires :

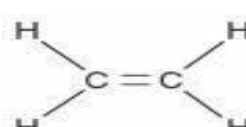
Les alcènes linéaires sont une classe d'hydrocarbures oléfiniques qui se caractérisent par une chaîne carbonée linéaire contenant au moins une double liaison carbone-carbone. Ils sont également appelés alcènes normaux ou alcènes linéaires. [2][3]

Voici quelques exemples d'alcènes linéaires courants :

- **Éthylène(C₂H₄) :**

Il s'agit du plus simple des alcènes linéaires, composé de deux atomes de carbone reliés par une double liaison.

Tableau I.1: Données physico-chimique d'Éthylène

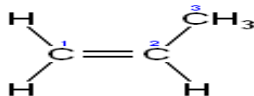
Données chimiques							
Formule		Forme			Masse molaire		
C ₂ H ₄					28,05 g.mol ⁻¹		
Données physiques							
Masse Volumique	Température de fusion	Température d'ébullition	Température critique	Pression critique	Température d'auto inflammation	Limites d'explosivité dans l'air	Solubilité dans l'eau
gazeux, 15°C, 101,3 kPa : 1,178.10 ⁻³ -g.cm ⁻³	-169,2°C	-103,9°C	9,19°C	5 060 kPa	490°C	entre 2,7 et 36 % en volume	à 17°C : 3,5 mg/10 0 g eau

CHAPITRE I : Les Hydrocarbures Oléfiniques

- **Propylène (C₃H₆):**

Il contient une chaîne de trois atomes de carbone avec une double liaison entre les deux premiers carbones.

Tableau I.2: Données physico-chimique de Propylène.

Données chimiques							
Formule		Forme			Masse molaire		
C3H6					42,079 7 ± 0,002 8 g/mol C 85,63 %, H 14,37 %[4]		
Données physiques							
Masse Volumique	Température de fusion	Température d'ébullition	Température critique	Pression critique	Température d'auto inflammation	Limites d'explosivité dans l'air	Solubilité dans l'eau
0,609 41 g ·cm ⁻³ (liquide, - 47,69 °C) 1,913 8 kg ·m ³ (gaz, 0 °C, 1. 013 mbar)	-185,24 °C [5]	-47,69 °C	91,75 °C [8]	4 594 kPa [7]	485 °C	1,8–11,2 %vol	384 mg·l ⁻¹ (eau, 20 °C) [6]

- **Butylène (C₄H₈):**

Il existe plusieurs isomères de butylènes, tous avec une chaîne de quatre atomes de carbone et une double liaison. Les principaux isomères sont le 1-butène (but-1-ène), CH₃-CH₂-CH=CH₂, et le 2-butène (but-2-ène), CH₃-CH=CH-CH₃, qui diffèrent par la position de la double liaison dans la chaîne.

Tableau I.3: Données physico-chimique de Butylène

<i>Données physico-chimique</i>							
<i>Isomères de butène</i>	<i>Formule moléculaire</i>	<i>Masse molaire</i>	<i>Point d'ébullition</i>	<i>Point de fusion</i>	<i>Densité</i>	<i>Solubilité dans l'eau</i>	<i>Solubilité dans les solvants organiques</i>
<i>1-butène</i>	C_4H_8	56,11 g/mol	-6,3 °C	-185,3 °C	0,624 g/cm ³ (à 20 °C)	<i>Insoluble</i>	<i>Soluble</i>
<i>2-butène</i>	C_4H_8	56,11 g/mol	-6,0 °C	-139,5 °C	0,601 g/cm ³ (à 20 °C)	<i>Insoluble</i>	<i>Soluble</i>

- **Pentène (C₅H₁₀):**

Il existe également plusieurs isomères de pentènes, chacun avec une chaîne de cinq atomes de carbone et une double liaison. Les principaux isomères sont le 1-pentène (pent-1-ène), CH₃-CH₂-CH₂-CH=CH₂, il est en effet souvent un sous-produit du craquage du pétrole.

Le 2-pentène (pent-2-ène), CH₃-CH₂-CH=CH-CH₃ et le 3-pentène (pent-3-ène). [1]

La nomenclature des alcènes linéaires suit les règles de la nomenclature des composés organiques. Leur réactivité chimique est influencée par la présence du double liaison, qui leur confère une certaine réactivité envers d'autres substances et permet leur utilisation dans divers processus chimiques et applications industrielles.

Les alcènes linéaires sont utilisés dans la production de polymères, tels que le polyéthylène, qui est l'un des plastiques les plus couramment utilisés dans le monde. Ils servent également de matières premières dans la synthèse de produits chimiques et de carburants.

I-3-2 Alcènes ramifiés :

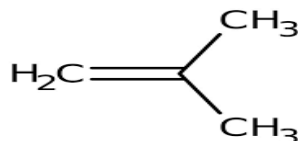
Les alcènes ramifiés sont une classe d'hydrocarbures oléfiniques qui présentent une chaîne carbonée contenant une ou plusieurs ramifications, c'est-à-dire des groupes alkyles attachés aux atomes de carbone de la chaîne principale. Contrairement aux alcènes linéaires, les alcènes ramifiés ont une structure non linéaire en raison de la présence de ces ramifications. [2][3]

CHAPITRE I : Les Hydrocarbures Oléfiniques

Voici quelques exemples d'alcènes ramifiés :

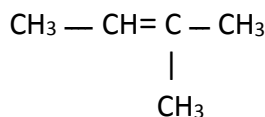
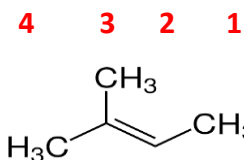
- **Isobutène (2-méthylpropène), (C₄H₈):**

Il s'agit d'un alcène ramifié avec une chaîne de quatre atomes de carbone et une ramification méthyle (-CH₃) attachée au deuxième carbone de la chaîne, et d'une forme chimique (CH₃)₂C=CH₂.



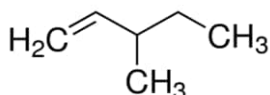
- **2-Méthyl-2-butène (C₅H₁₀):**

Il contient une chaîne de cinq atomes de carbone avec une ramification méthyle (-CH₃) attachée au deuxième carbone de la chaîne.



- **3-Méthyl-1-pentène (C₆H₁₂):**

Il présente une chaîne de six atomes de carbone avec une ramification méthyle (-CH₃) attachée au troisième carbone de la chaîne.



- **4-Ethyl-1-heptène (C₈H₁₆):**

Cet alcène ramifié a une chaîne de huit atomes de carbone avec une ramification éthyle (-CH₂CH₃) attachée au quatrième carbone de la chaîne.

Les alcènes ramifiés présentent des propriétés physiques et des réactivités chimiques similaires à celles des alcènes linéaires. Cependant, la présence de ramifications peut influencer la réactivité chimique spécifique de ces composés.

I-3-3 Les Diènes :

Les diènes sont des hydrocarbures qui contiennent deux doubles liaisons carbone-carbone dans leur structure moléculaire. Ils sont donc des composés insaturés et font partie de la famille des alcènes. Les diènes peuvent être linéaires ou ramifiés, et ils peuvent présenter différentes configurations géométriques des doubles liaisons. [2][3]

Voici deux exemples courants de diènes :

- **1,3-Butadiène** : $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$

Le 1,3-butadiène est un diène linéaire qui contient une chaîne de quatre atomes de carbone avec deux doubles liaisons, situées aux positions 1 et 3 de la chaîne.

- **2,3-Diméthyle-1,3-butadiène** : $\text{CH}_3-\text{C}(\text{CH}_3)=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{CH}=\text{CH}_2$

Ce diène est ramifié, avec des groupes méthyle (CH_3) attachés aux atomes de carbone en position 2 et 3 de la chaîne principale. Il présente également une double liaison entre les atomes de carbone en position 3 et 4.

Les diènes jouent un rôle important en chimie organique, notamment dans la formation de polymères, la synthèse de composés organiques complexes et la participation à des réactions d'addition et de cyclisation. [1]

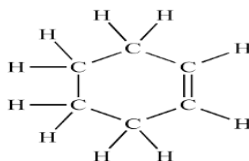
I-3-4 Alcènes cycliques :

Les alcènes cycliques, également connus sous le nom de cycloalcènes, sont des hydrocarbures insaturés qui possèdent une structure cyclique avec une ou plusieurs doubles liaisons carbone-carbone. Ces composés présentent une double liaison à l'intérieur du cycle, ce qui leur confère des propriétés et des réactivités spécifiques. [2][3]

Voici quelques exemples d'alcènes cycliques courants :

- **Cyclohexène (C_6H_{10}):**

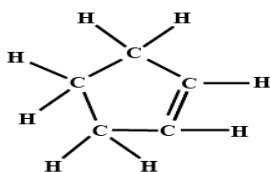
Le cyclohexène est un alcène cyclique à six atomes de carbone dans son cycle. Il contient une double liaison à l'intérieur du cycle, ce qui lui confère une structure aromatique. Le cyclohexène est utilisé comme matière première dans la production de divers produits chimiques et polymères.



Cyclohexène (C₆H₁₀)

- **Cyclopentène (C₅H₈):**

Le cyclopentène est un alcène cyclique à cinq atomes de carbone dans son cycle. Il contient une double liaison à l'intérieur du cycle et présente une géométrie plane. Le cyclopentène est utilisé comme monomère dans la synthèse de divers polymères.

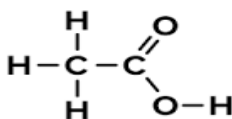


Cyclopentène (C₅H₈)

Les alcènes cycliques peuvent être utilisés dans divers domaines, tels que la chimie organique, la synthèse de produits pharmaceutiques, la production de plastiques et de caoutchoucs, ainsi que dans les réactions de cyclisation pour former des composés cycliques plus complexes.

I-3-5 Alcènes fonctionnalisés :

Ce sont des oléfines qui contiennent des groupes fonctionnels autres que les atomes de carbone et d'hydrogène. Par exemple, l'éthylène glycol (C₂H₄O₂) contient un groupe hydroxyle (-OH) attaché à l'un des carbones de la double liaison.[2][3]



Ethylène glycol (C₂H₄O₂)

Ces classes d'hydrocarbures oléfiniques présentent différentes propriétés physiques et réactivités chimiques, ce qui les rend utiles dans diverses applications industrielles telles que la production de plastiques, de carburants et de produits chimiques.

I- 4 Procédés d'obtention des oléfines :

L'obtention des oléfines peut se faire par différents procédés, tels que le Vapocraquage (steam cracking), le craquage catalytique du pétrole (16 à 25 % en masse de l'effluent)[8] , le procédé MTO (Méthanol-to-Olefins, sélectivité élevée en oléfines 90% massique)[9] ,la déshydrogénation (90 à 95% d'oléfinas)[10] ,et d'autres méthodes spécifiques à certaines molécules de départ.

On observe une tendance où les producteurs d'oléfinas en Europe se concentrent principalement sur la production d'éthylène. Lors de la production d'oléfinas par le procédé de Vapocraquage, les rendements varient en fonction des matières premières utilisées et des procédés employés. Voici un résumé des rendements typiques obtenus :

Type de charge	Produits obtenus		
Ethane	78 % d'éthylène	3% de propylène	19 % d'autres fractions (C4 et aromatiques)
Propane	45 % d'éthylène	15% de propylène	40 % de fractions plus lourdes
Butane	37 % d'éthylène	17% de propylène	46 % de fractions plus lourdes
Naphta	25 % et 35 % éthylène	16% de propylène	Présence notable d'essence de pyrolyse
Gazole	Rendement d'éthylène inférieur d'environ 10 % par rapport au craquage du naphta, il est variable en fonction des caractéristiques du gazole.		

Tableau I-4 : Rendement des produits obtenus par vapocraquage selon la charge [11]

L'industrie chimique continue de développer de nouvelles technologies et de nouveaux procédés pour améliorer l'efficacité de la production d'oléfinas, réduire l'impact environnemental et répondre à la demande croissante de ces produits chimiques essentiels.

CHAPITRE I : Les Hydrocarbures Oléfiniques

Dans l'ensemble, les oléfines sont des composés chimiques polyvalents et importants, qui jouent un rôle central dans de nombreux aspects de notre vie quotidienne, de l'emballage et des produits ménagers aux matériaux de construction et aux produits pharmaceutiques.

I- 4-1 Vapocraquage (Steam cracking):

a)-Historique:

Le vapocraquage, également connu sous le nom de steam-cracking, est un procédé chimique utilisé pour produire des oléfines à grande échelle. Il a été développé pour la première fois dans les années 1910 par Friedrich Bergius et Hans Goldschmidt. Le procédé utilise de la vapeur d'eau et des catalyseurs pour décomposer les molécules d'hydrocarbures en produits chimiques plus légers, tels que l'éthylène et le propylène.[12]

Au fil des décennies, le vapocraquage a connu des améliorations et des optimisations constantes pour augmenter l'efficacité du processus et répondre à la demande croissante en produits chimiques dérivés des oléfines. Il est devenu un procédé clé dans l'industrie pétrochimique, avec des installations à travers le monde produisant des quantités significatives d'oléfinas.

Le vapocraquage est largement utilisé pour la production de plastiques, de caoutchoucs, de fibres synthétiques et d'autres matériaux polymères. Il est également essentiel dans la fabrication de solvants, d'additifs pour carburants, de produits pharmaceutiques et d'autres produits chimiques industriels.

Aujourd'hui, le vapocraquage continue d'évoluer avec des avancées technologiques visant à améliorer l'efficacité énergétique, à réduire les émissions et à promouvoir une production plus durable d'oléfinas. C'est un procédé essentiel qui joue un rôle clé dans l'industrie chimique moderne pour répondre à la demande mondiale croissante en produits chimiques dérivés des oléfines.

b)-Définition de Vapocraquage :

Le vapocraquage est un processus essentiel de raffinage pétrochimique qui utilise la pyrolyse pour décomposer les hydrocarbures lourds en produits chimiques plus légers. Ce processus consiste à vaporiser les hydrocarbures, puis à les chauffer à des températures élevées en l'absence d'oxygène pour les décomposer en fragments plus petits.[13]

Le vapocraquage est utilisé pour produire une gamme de produits chimiques de base tels que l'éthylène, le propylène, le butadiène, le benzène et d'autres composés aromatiques qui sont ensuite

CHAPITRE I : Les Hydrocarbures Oléfiniques

utilisés dans la fabrication de plastiques, de produits pharmaceutiques, de solvants, d'adhésifs et de peintures. Les conditions opératoires telles que la température, la pression et la durée de séjour dans le réacteur jouent un rôle important dans la détermination de la composition des produits formés.

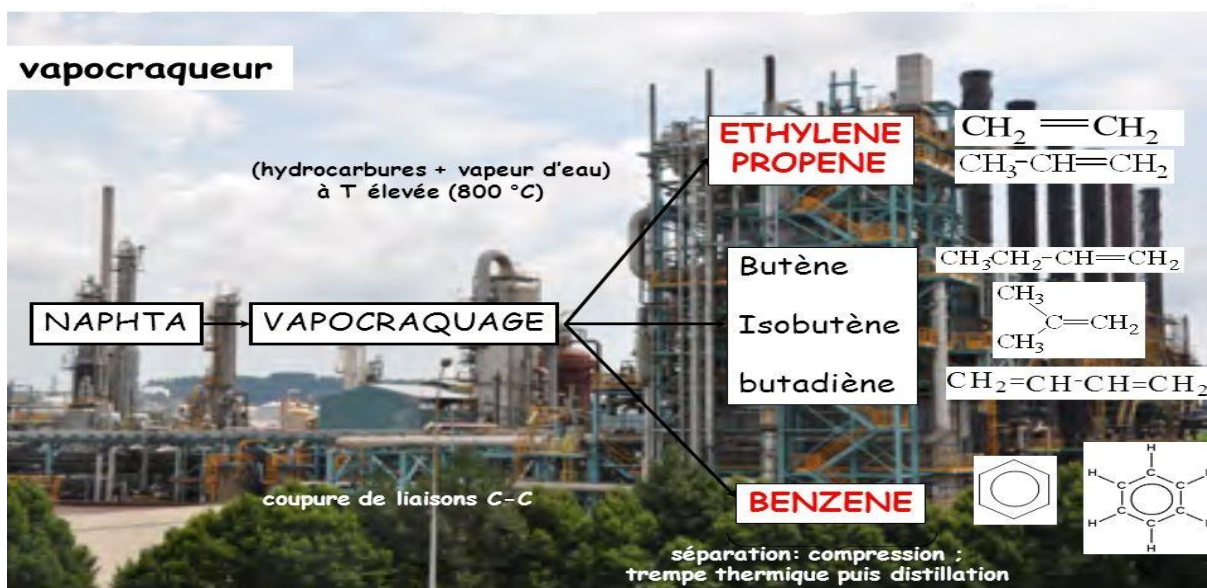


Figure I.1 : Exemple d'un Vapocraqueur industriel [14]

c)- Principe de fonctionnement :

Le principe de travail du vapocraquage repose sur la rupture des liaisons entre les atomes de carbone (C) et les atomes d'hydrogène (H) à l'intérieur des molécules d'hydrocarbures. Ce procédé thermique est réalisé à haute température en l'absence d'oxygène, ce qui favorise la formation de molécules insaturées.

Lorsque la charge d'hydrocarbures est chauffée dans le four de vapocraquage, les liaisons entre les atomes de carbone et les atomes d'hydrogène sont affaiblies en raison de l'apport d'énergie thermique. Cela entraîne la rupture de ces liaisons, ce qui conduit à la formation de radicaux libres. Ces radicaux libres réagissent ensuite les uns avec les autres, conduisant à la formation de nouvelles molécules avec des liaisons multiples, également appelées molécules insaturées.

Les produits principaux du vapocraquage sont généralement l'éthylène (C_2H_4), le propylène (C_3H_6) et le butadiène (C_4H_6), qui sont des composés chimiques très importants dans l'industrie pétrochimique. Ces molécules insaturées peuvent ensuite être utilisées comme matières premières pour la production de divers produits chimiques, tels que des plastiques, des solvants, des caoutchoucs synthétiques et d'autres produits dérivés.

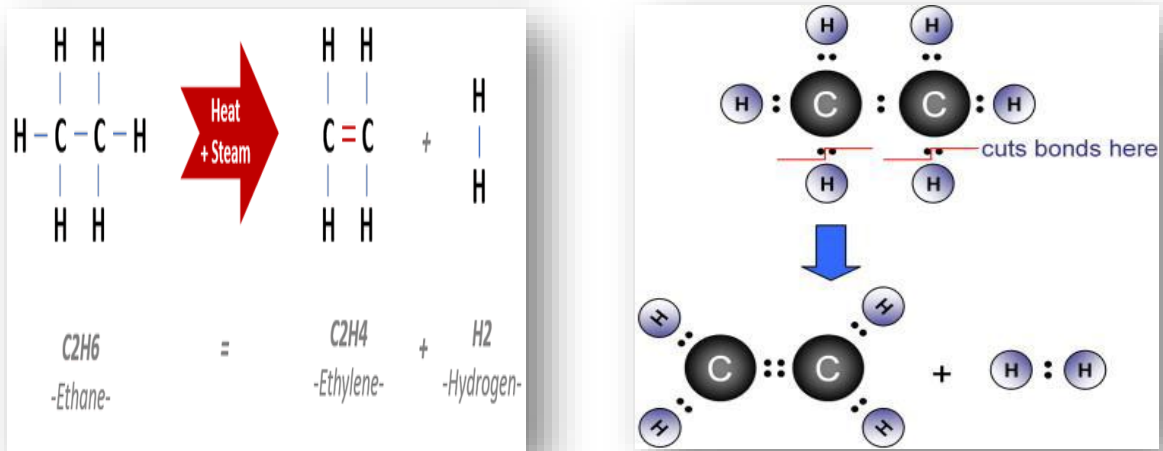


Figure I.2: Schéma simplifié de vapocraquage d'Ethane [15]

d)- Description du Procédé de Vapocraquage :

Le procédé de vapocraquage est utilisé dans l'industrie pétrochimique pour convertir les hydrocarbures gazeux ou liquides tels que le naphta, le GPL (gaz basse pression) ou l'éthane en produits chimiques de base tels que l'éthylène, le propylène et le butadiène. Voici les principales étapes du procédé :[16]

- **Préparation de la charge :**

La charge, qui est l'hydrocarbure utilisé comme matière première, est diluée avec de la vapeur d'eau pour faciliter la réaction chimique. Ensuite, elle est chauffée brièvement dans un four, sans présence d'oxygène.

- **Section chaude :**

Cette section comprend le four, qui est l'équipement clé du procédé de vapocraquage. Le four est généralement composé de deux sections, la section de convection et la section radiante, qui permettent le transfert de chaleur nécessaire à la réaction chimique. Outre le four, cette section comprend également le fractionneur primaire et la chaudière de trempe, où les effluents sont refroidis rapidement pour éviter les réactions indésirables.

- **Section de compression :**

Dans cette section, les effluents sont comprimés à plusieurs étapes à l'aide de compresseurs. Des épurateurs et des sécheurs caustiques sont également utilisés pour éliminer les impuretés et assurer la pureté des produits.

- **Section froide :**

Cette section est dédiée à la séparation des produits de pyrolyse. Les effluents s'écoulent d'abord dans un déméthaniseur, où le méthane et l'hydrogène sont condensés en tête. Ensuite, le reste du produit est dirigé vers un dé-éthaniseur pour séparer la fraction C2 (éthane + éthylène). La fraction C2 est ensuite envoyée vers un séparateur éthane-éthylène pour récupérer séparément l'éthylène et l'éthane. Le mélange gazeux issu du fond du dé-éthaniseur passe ensuite par un dépropaniseur pour purger la fraction C3 (propylène et propane), puis vers un débutaniseur pour séparer le mélange C4. Les composés C5+ les plus lourds sont récupérés en tant qu'essence de pyrolyse ou produit de fond.

En plus de ces étapes principales, des traitements intermédiaires sont réalisés pour la purification des produits. Il est important de noter que malgré les précautions prises, la formation de coke sur les équipements est inévitable. Par conséquent, un processus de décokage périodique est nécessaire pour éliminer le coke et maintenir les performances du procédé.

La figure suivante présente une vue d'ensemble du procédé typique de vapocraquage et des équipements utilisés :

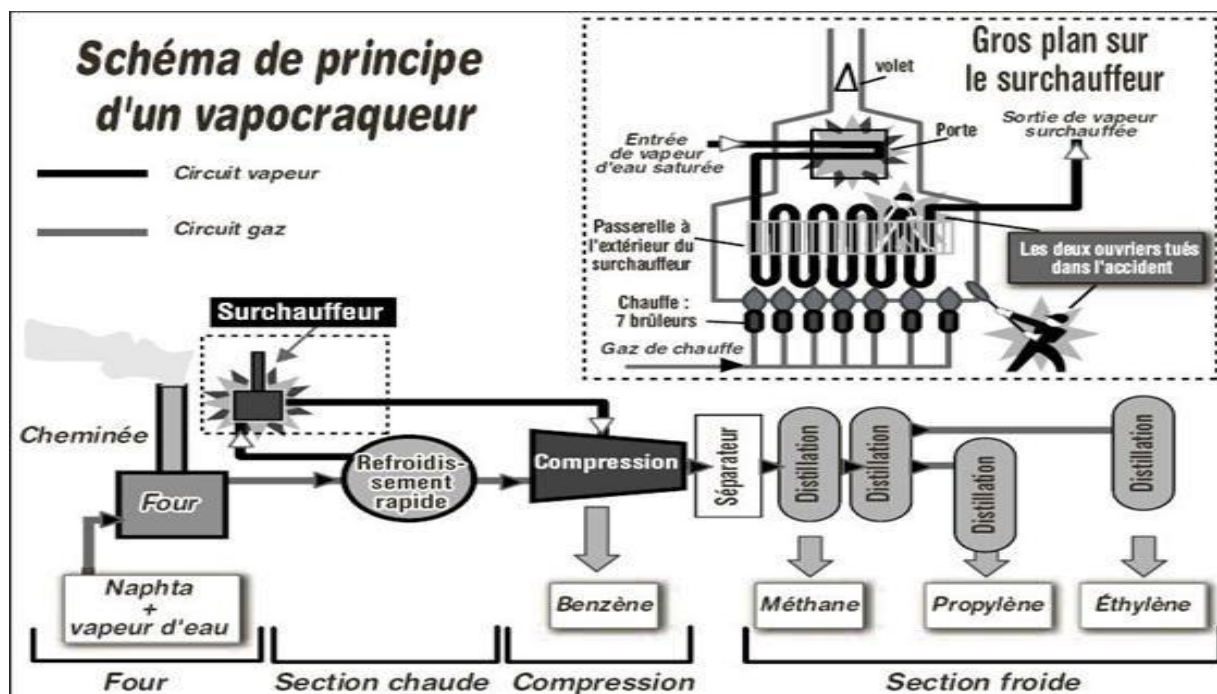


Figure I.3 : Schéma explicatif d'un procédé de vapocraquage [17]

e)- Conditions opératoires :

Dans le procédé de vapocraquage, plusieurs conditions opératoires doivent être prises en compte pour assurer le bon déroulement de la réaction de craquage. Voici quelques-unes des principales conditions :[18]

- **Température :**

La température est un facteur crucial dans le vapocraquage. Les réactions qui se produisent sont endothermiques, ce qui signifie qu'elles nécessitent une quantité importante d'énergie thermique. Une température élevée favorise la formation d'oléfines et d'aromatiques, mais elle peut également favoriser la formation de coke. La température optimale se situe généralement autour de 800°C.

- **Pression :**

La pression dans le procédé de vapocraquage doit être maintenue légèrement supérieure à la pression atmosphérique (P atm). Cela garantit un flux adéquat des réactifs et favorise le craquage des hydrocarbures.

- **Temps de séjour (résidence) :**

Le temps de séjour fait référence à la durée pendant laquelle les réactifs restent dans le système de vapocraquage. Il dépend de la nature de la charge utilisée. Un temps de séjour court favorise la formation d'oléfines, tandis qu'un temps de séjour plus long favorise la formation d'aromatiques et d'oléfines à partir de charges liquides telles que le naphta.

- **Charge de vapeur :**

L'injection de vapeur d'eau est une étape importante du procédé de vapocraquage. Elle joue un rôle clé dans la dilution de la charge, ce qui réduit la pression partielle des hydrocarbures. Cela favorise le craquage et aide à minimiser la formation de coke dans le four. La réaction de reformage à la vapeur (Water shift) est un exemple de réaction qui se produit, réduisant la formation de coke : $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$.

- **Charge de vapocraquage :**

Le vapocraquage peut être effectué avec diverses matières premières telles que l'éthane, le propane, le butane, le naphta et le gazole. L'éthane du gaz naturel et le naphta issu du raffinage sont les principales charges utilisées. L'utilisation de l'éthane comme charge conduit à des rendements élevés en éthylène, tandis que l'utilisation du naphta donne également du propylène et des aromatiques.

Il est important de noter que les conditions opératoires peuvent varier en fonction des spécifications de chaque unité de vapocraquage et des objectifs de production spécifiques. Ces conditions sont soigneusement ajustées pour maximiser les rendements en produits désirés tout en minimisant la formation de sous-produits indésirables comme le coke.

I- 4-2 Craquage catalytique :

a)- Définition :

Le craquage catalytique est un procédé chimique utilisé dans l'industrie pétrochimique pour convertir les hydrocarbures lourds en produits pétroliers plus légers et plus valorisables, tels que l'essence, le diesel et le kérosène. Il implique l'utilisation d'un catalyseur qui accélère la réaction de craquage, c'est-à-dire la rupture des liaisons chimiques au sein des molécules d'hydrocarbures.

b)- Description de procédé :

Le craquage catalytique est généralement réalisé dans des unités appelées catalyseurs fluidisés ou lits fixes. Les hydrocarbures lourds, tels que les distillats atmosphériques ou les résidus de pétrole, sont mélangés avec un catalyseur spécifique, généralement composé de silice-alumine ou de zéolites. Le mélange est ensuite chauffé à des températures élevées (environ 500-600°C) et soumis à une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique.

Sous l'action du catalyseur, les hydrocarbures se décomposent en fragments plus petits, principalement par rupture des liaisons C-C et C-H. Cela conduit à la formation de produits pétroliers plus légers, tels que des alcanes, des oléfines et des composés aromatiques. Le catalyseur favorise également des réactions secondaires, telles que la réduction des composés soufrés et le réarrangement des produits.[19]

Le craquage catalytique présente plusieurs avantages par rapport au vapocraquage, notamment une plus grande flexibilité dans le choix des charges, une meilleure conversion des résidus pétroliers lourds et une meilleure sélectivité pour les produits souhaités. De plus, le catalyseur utilisé peut être régénéré et réutilisé, ce qui permet de prolonger sa durée de vie.

La figure suivante présente une description générale du procédé typique de craquage catalytique et des équipements utilisés :

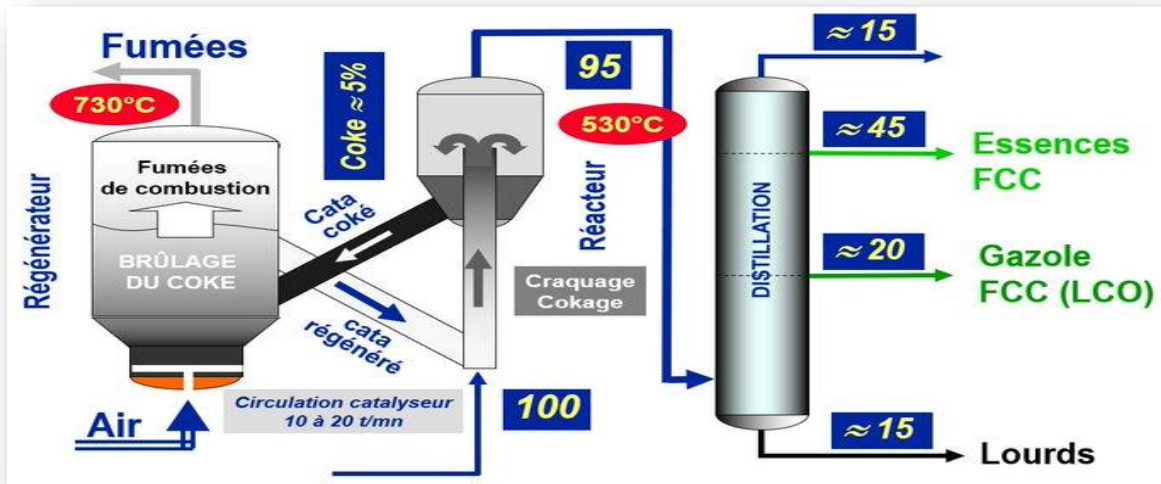


Figure I.4: Schéma de Principe de craquage catalytique [20]

c)- Conditions opératoires :

Le craquage catalytique nécessite des conditions de fonctionnement spécifiques, telles que la température, la pression, le temps de séjour et la composition du catalyseur, pour obtenir des rendements élevés en produits souhaités et minimiser les sous-produits indésirables. Ces conditions peuvent varier en fonction du type de charge et des objectifs de production spécifiques de chaque unité de craquage catalytique. [21]

I- 4-3 Procédé MTO (Méthanol-to-Olefins):

a)- Définition :

Le procédé MTO (Méthanol-to-Olefins) est une technologie utilisée pour convertir le méthanol en oléfines, telles que l'éthylène et le propylène. Il s'agit d'un procédé catalytique largement utilisé dans l'industrie pétrochimique pour produire ces composés clés à partir d'une matière première abondante et peu coûteuse, le méthanol. [22][23]

b)- Description de procédé :

C'est un processus catalytique qui implique plusieurs étapes. Le méthanol est préparé à partir de sources de carbone telles que le gaz naturel ou le charbon. Ensuite, il est introduit dans un réacteur catalytique contenant des zéolites spéciales. Les zéolites accélèrent la réaction de craquage, où les liaisons chimiques du méthanol sont rompues pour former des oléfines légères. Les oléfines produites sont ensuite séparées et purifiées pour obtenir des produits d'oléfines de haute pureté. Ces

oléfines peuvent être utilisées comme matières premières pour la production de divers produits chimiques et polymères. [22][23]

Le procédé MTO présente des avantages tels que la flexibilité des matières premières et une intégration possible avec d'autres procédés pétrochimiques, mais il comporte également des défis tels que la dégradation catalytique. Des recherches sont en cours pour améliorer l'efficacité et la sélectivité du procédé MTO, en faisant une technologie clé pour la production d'oléfines à partir de ressources alternatives.

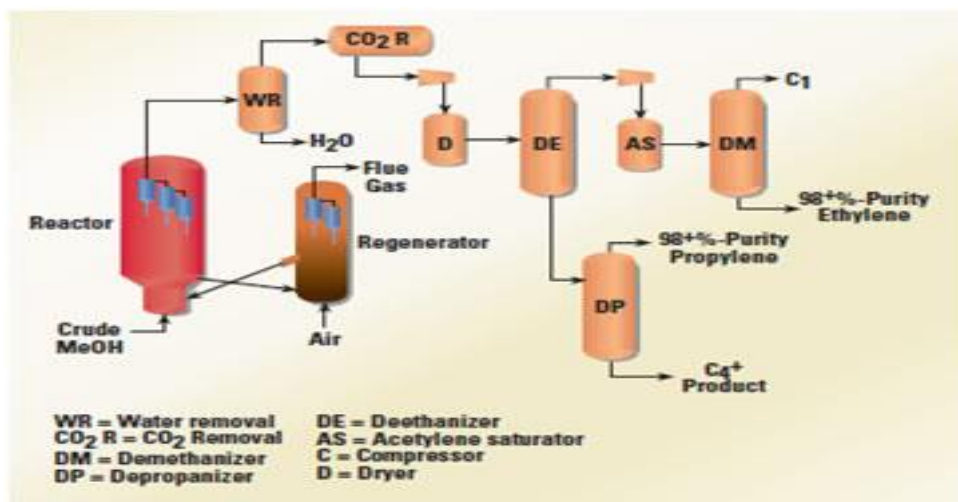


Figure I-5 Procédé MTO (Méthanol-to-Olefins)[24]

I- 4-4 Procédé de déshydrogénation:

a)- Définition de procédé:

La déshydrogénation est un procédé clé dans l'industrie chimique pour la production d'alcènes à partir d'alcanes et d'autres composés saturés, il est une réaction chimique qui implique la perte d'atomes d'hydrogène (H) à partir d'une molécule, conduisant à la formation d'une molécule insaturée, tels que des alcanes en alcènes, [25]

b)- Description de procédé :

Un catalyseur est généralement utilisé pour accélérer la réaction chimique. Le cuivre (Cu) et l'argent (Ag) sont deux exemples de catalyseurs couramment utilisés dans la déshydrogénation. Ces catalyseurs facilitent la rupture des liaisons C-H et favorisent la formation de nouvelles liaisons double C=C, et les conditions de température et de pression sont ajustées pour optimiser la réaction.

CHAPITRE I : Les Hydrocarbures Oléfiniques

La déshydrogénation est largement utilisée dans l'industrie pétrochimique pour la production d'alcènes, qui sont des précurseurs importants pour de nombreux produits chimiques et matériaux, tels que les plastiques, les fibres synthétiques et les caoutchoucs.[26]

Exemple : Déshydrogénation d'un alcane pour donner un alcène.



Éthane $\Rightarrow$ (éthylène) + (dihydrogène)

I- 5 Les oléfines dans la pétrochimie :

I-5-1 L'importance des oléfines :

Les oléfines, également appelées hydrocarbures insaturés ou alcènes, jouent un rôle essentiel dans l'industrie pétrochimique. Leur importance découle de leurs propriétés chimiques et de leur capacité à former une large gamme de produits chimiques utiles.[27] [29]

Voici quelques raisons clés qui expliquent l'importance des oléfines dans la pétrochimie :

- **Matière première pour la production de polymères :** Les oléfines sont utilisées comme matière première dans la production de polymères tels que le polyéthylène, le polypropylène et le polystyrène. Ces polymères sont largement utilisés dans diverses applications industrielles et de consommation, notamment dans les emballages, les textiles, les plastiques, les revêtements et les fibres.
- **Intermédiaires chimiques :** Les oléfines sont des précurseurs importants pour la production d'intermédiaires chimiques. Par exemple, l'éthylène est utilisé pour produire de l'éthanol, de l'éthylbenzène, de l'éthylène glycol et d'autres produits chimiques. Le propylène est utilisé dans la production d'acrylonitrile, de propylène glycol, de peroxyde de propylène, entre autres.
- **Carburants et combustibles :** Certaines oléfines, telles que le propylène et le butadiène, sont utilisées comme additifs dans l'essence pour améliorer les performances des carburants. De plus, les oléfines sont également utilisées comme combustibles dans l'industrie chimique et comme source d'énergie dans les procédés industriels.
- **Solvants et produits chimiques spéciaux :** Les oléfines peuvent servir de solvants dans diverses applications industrielles, telles que la dissolution des graisses et des huiles. Elles sont également utilisées pour produire des produits chimiques spéciaux, tels que les tensioactifs, les plastifiants, les lubrifiants et les adhésifs.

- **Réactifs chimiques** : Les oléfines sont couramment utilisées comme réactifs dans une variété de réactions chimiques, telles que l'oxydation, l'hydrogénation et la polymérisation. Elles sont souvent utilisées pour introduire des groupes fonctionnels spécifiques dans des composés chimiques complexes.

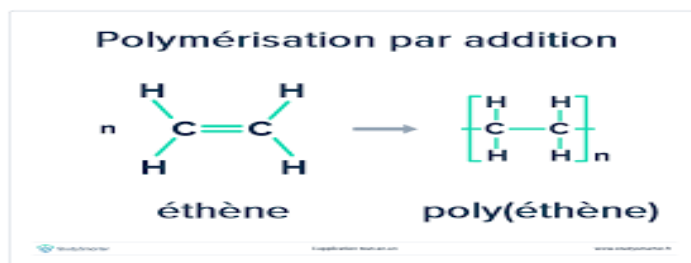
En résumé, les oléfines jouent un rôle central dans l'industrie pétrochimique en tant que matière première pour la production de polymères, d'intermédiaires chimiques, de carburants, de solvants et de nombreux autres produits chimiques. Leur polyvalence et leurs propriétés chimiques uniques en font des composés essentiels pour de nombreuses applications industrielles et de consommation.

I-5-2 Valorisation des oléfines :

La valorisation des oléfines dans l'industrie pétrochimique est un processus visant à maximiser l'utilisation et la transformation des oléfines en produits chimiques à haute valeur ajoutée.

Voici quelques-unes des principales voies de valorisation des oléfines [27] :

- **Polymérisation** : Les oléfines telles que l'éthylène, le propylène et le butadiène sont couramment utilisées comme matières premières dans la production de polymères. La polymérisation des oléfines permet de créer des polymères tels que le polyéthylène, le polypropylène, le polybutadiène et d'autres matériaux plastiques utilisés dans une large gamme d'applications.



Exemple de polymérisation d'éthylène

- **Synthèse d'intermédiaires chimiques** : Les oléfines peuvent être transformées en intermédiaires chimiques tels que l'éthylbenzène, le propylène glycol, le butanol et d'autres composés organiques. Ces intermédiaires chimiques servent ensuite de matières premières pour la fabrication de produits chimiques spécifiques tels que les plastifiants, les solvants, les tensioactifs et les additifs.
- **Alkylation et oligomérisation** : Les oléfines peuvent être utilisées comme réactifs dans des réactions d'alkylation et d'oligomérisation pour produire des composés chimiques plus

complexes. Par exemple, l'alkylation de l'éthylène avec le propylène peut conduire à la production d'alkylbenzènes utilisés dans les détergents. L'oligomérisation des oléfines peut donner des produits tels que les oligomères d'éthylène et de propylène, qui sont utilisés comme lubrifiants et additifs pour carburants.

- **Conversion en produits chimiques spéciaux :** Les oléfines peuvent être converties en divers produits chimiques spéciaux, tels que les alcools, les cétones, les aldéhydes et les acides. Par exemple, l'éthylène peut être converti en éthanol, en éthylène glycol ou en acide acétique, qui ont de nombreuses applications industrielles.
- **Production d'aromatiques :** Les oléfines peuvent être utilisées comme matières premières dans la production d'aromatiques tels que le benzène, le toluène et le xylène. Ces composés sont largement utilisés dans l'industrie chimique pour la fabrication de plastiques, de solvants, de fibres et d'autres produits chimiques.

En résumé, la valorisation des oléfines dans l'industrie pétrochimique implique leur conversion en polymères, intermédiaires chimiques, produits chimiques spéciaux, aromatiques et autres produits chimiques à haute valeur ajoutée. Cette valorisation permet d'optimiser l'utilisation des oléfines et de répondre aux besoins croissants des industries chimiques et de consommation en produits chimiques diversifiés et de haute qualité.

I- 6 Caractéristiques des oléfines:

Voici quelques propriétés importantes des oléfines [28] :

- **Insaturation :** Les oléfines contiennent au moins une double liaison carbone-carbone, ce qui les rend insaturées par rapport aux hydrocarbures saturés tels que les alcanes. Cette insaturation confère aux oléfines une plus grande réactivité chimique.
- **Réactivité chimique :** Les oléfines sont plus réactives que les alcanes en raison de la présence de la double liaison carbone-carbone. Elles peuvent subir diverses réactions chimiques telles que l'addition, la polymérisation, la déshydrogénation et la réaction d'oxydation.
- **Isomérisie :** Les oléfines peuvent exister sous forme d'isomères, ce qui signifie qu'elles ont la même formule brute mais une structure moléculaire différente. Les isomères des oléfines peuvent différer dans la position de la double liaison ou dans l'arrangement spatial des groupes fonctionnels.

- **Point d'ébullition** : Les oléfines sont généralement des gaz ou des liquides volatils à température ambiante en raison de leur faible poids moléculaire. Cependant, le point d'ébullition des oléfines augmente avec l'augmentation de la longueur de la chaîne carbonée.
- **Propriétés physiques** : Les oléfines sont généralement moins denses que l'eau et ont une faible solubilité dans celle-ci. Elles sont inflammables et peuvent brûler avec une flamme jaune. Les oléfines sont également moins visqueuses que les alcanes de même poids moléculaire.
- **Utilisations industrielles** : Les oléfines sont des matières premières essentielles dans l'industrie pétrochimique. Elles sont utilisées pour produire une large gamme de produits, notamment des plastiques (polyéthylène, polypropylène), des solvants, des produits chimiques de spécialité, des carburants, des lubrifiants et des produits pharmaceutiques.

En résumé, les oléfines sont des hydrocarbures insaturés dotés d'une double liaison carbone-carbone, ce qui leur confère une réactivité chimique élevée. Elles ont des propriétés physiques et chimiques distinctes et sont utilisées dans diverses industries pour produire une grande variété de produits chimiques et de matériaux.

I- 7 Les domaines d'utilisation des oléfines:

Les oléfines, en particulier l'éthylène, le propylène et le butylène, sont utilisées dans de nombreux domaines de l'industrie et de la vie quotidienne. [29]

Voici quelques-uns des principaux domaines dans lesquels les oléfines sont utilisées :

- **Pétrochimie** : Les oléfines sont la principale matière première de l'industrie pétrochimique. Elles sont utilisées pour produire une grande variété de produits chimiques tels que les plastiques, les fibres synthétiques, les caoutchoucs synthétiques, les solvants, les produits chimiques de spécialité, les produits pharmaceutiques et les produits agrochimiques.
- **Plastiques** : L'éthylène et le propylène sont les principaux composants utilisés dans la production de plastiques. Le polyéthylène et le polypropylène sont les plastiques les plus couramment fabriqués à partir d'oléfinas et sont utilisés dans une large gamme d'applications, y compris les emballages, les revêtements, les films, les fibres et les pièces moulées.

- **Caoutchoucs synthétiques** : Les oléfines sont utilisées dans la fabrication de caoutchoucs synthétiques tels que le polybutadiène et le polyisoprène. Ces caoutchoucs sont utilisés dans la production de pneus, de produits d'étanchéité, de tapis, de courroies et de nombreuses autres applications.
- **Produits chimiques de spécialité** : Les oléfines sont utilisées comme matière première pour la fabrication de divers produits chimiques de spécialité, tels que les tensioactifs, les lubrifiants, les additifs pour carburants, les agents de nettoyage, les produits chimiques pour l'industrie cosmétique et les produits chimiques pour l'industrie pharmaceutique.
- **Carburants** : Les oléfines peuvent également être utilisées comme composants dans la production de carburants, notamment les carburants pour avions, les carburants pour moteurs automobiles et les carburants pour équipements industriels.
- **Produits agrochimiques** : Les oléfines sont utilisées dans la production de produits agrochimiques tels que les herbicides, les insecticides et les fertilisants.
- **Produits pharmaceutiques** : Les oléfines sont utilisées dans la production de certains médicaments et produits pharmaceutiques, notamment les produits chimiques de base utilisés dans la synthèse de médicaments.
- **Cosmétiques et produits d'hygiène** : Les oléfines peuvent être présentes dans certains produits cosmétiques, tels que les lotions, les crèmes et les produits capillaires.

Il convient de noter que les oléfines sont des matières premières polyvalentes et que leur utilisation peut varier en fonction des besoins spécifiques de chaque industrie et application.

CHAPITRE I : Les Hydrocarbures Oléfiniques

La figure ci-dessous montre des exemples de domaines d'utilisation des oléfines:

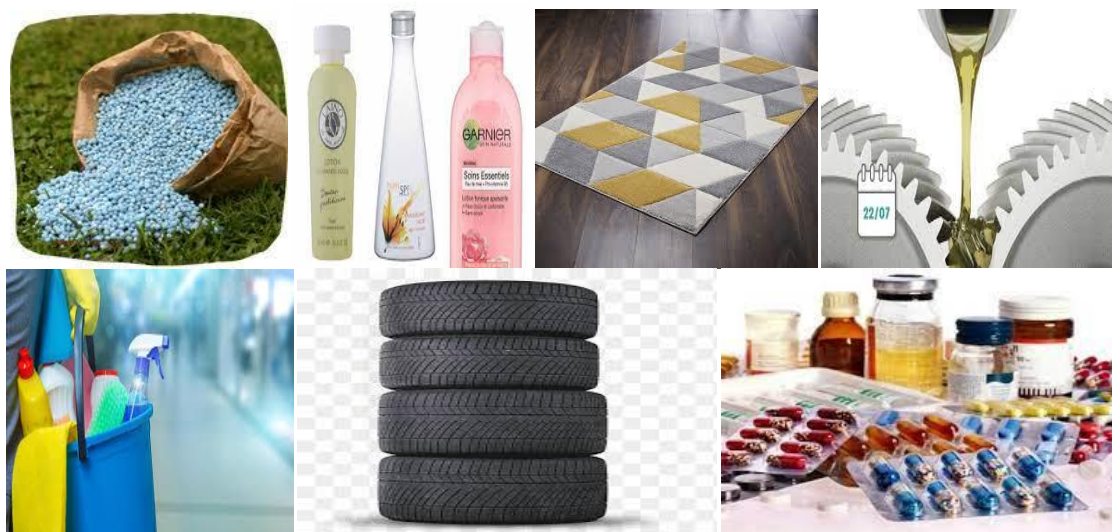


Figure I.6 : Quelques exemples de domaine d'application des oléfines



CHAPITRE II

LES POLYOLEFINES

II-1 Historique des polyoléfines:

Les polyoléfines sont des polymères thermoplastiques dérivés des oléfines, tels que le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP). Le polyéthylène a été découvert dans les années 1930, tandis que le polypropylène a été développé dans les années 1950 par des chercheurs italiens.

Depuis lors, les polyoléfines sont devenues des polymères largement utilisés dans de nombreuses applications en raison de leurs propriétés polyvalentes. Des variations et des grades spécifiques ont été développés pour répondre aux besoins des différentes applications. Au fil des décennies, la recherche s'est concentrée sur l'amélioration des propriétés, la réduction de l'impact environnemental et le développement de procédés de production plus efficaces.

De nouvelles technologies de recyclage sont également en cours de développement pour gérer les déchets de polyoléfines. Ainsi, les polyoléfines ont connu une évolution significative depuis leur découverte, contribuant largement à diverses industries.[30]

II-2 Définition des polyoléfines :

Les polyoléfines sont des polymères thermoplastiques dérivés des oléfines, tels que le polyéthylène et le polypropylène. Ils sont légers, résistants à la corrosion, aux produits chimiques et faciles à transformer. Le polyéthylène est utilisé dans les bouteilles en plastique, les emballages, les tuyaux, etc., tandis que le polypropylène est utilisé dans les applications automobiles, les emballages alimentaires, les textiles, etc. Les polyoléfines sont recyclables et jouent un rôle essentiel dans de nombreux secteurs industriels.[31]

II-3 Types des polyoléfines :

Les polyoléfines sont une famille de polymères thermoplastiques dérivés des oléfines. Voici quelques-uns des types courants de polyoléfines [31] :

- **Polyéthylène (PE)** : Le polyéthylène est l'une des polyoléfines les plus couramment utilisées. Il existe différents types de polyéthylène, notamment le polyéthylène haute densité (PEHD), le polyéthylène basse densité (PEBD) et le polyéthylène linéaire basse densité (PELBD). Chaque type de polyéthylène a des propriétés spécifiques adaptées à différentes applications.

- **Polypropylène (PP)** : Le polypropylène est un autre type courant de polyoléfine. Il est largement utilisé dans les applications automobiles, les emballages alimentaires, les textiles, les produits médicaux, etc. Le polypropylène peut également être modifié pour obtenir des propriétés spécifiques, tels que le polypropylène impact-modifié.
- **Polybutène (PB)** : Le polybutène est une polyoléfine utilisée dans les applications nécessitant une résistance à la chaleur et une flexibilité, comme les tuyaux d'eau chaude et les produits d'étanchéité.
- **Polystyrène (PS)** : Le polystyrène est une polyoléfine courante utilisée dans la fabrication de produits en mousse, tels que les emballages protecteurs, les isolants et les ustensiles jetables.
- **Polyéthylène réticulé (PEX)** : Le polyéthylène réticulé est un type de polyéthylène qui a subi un processus de réticulation pour améliorer sa résistance à la chaleur et sa capacité à transporter des fluides. Il est utilisé dans les systèmes de plomberie, les câbles électriques et les applications de chauffage par le sol.
- **Polyéthylène à faible densité linéaire (LLDPE)** : Le polyéthylène à faible densité linéaire est un type de polyéthylène qui présente une structure de chaîne plus linéaire que le polyéthylène basse densité. Il offre une résistance accrue aux chocs et à la perforation, et est utilisé dans les films d'emballage, les sacs, les revêtements et autres applications.

Ces sont quelques-uns des types courants de polyoléfines, mais il en existe d'autres, tels que le polyéthylène métallocène (mPE), le polypropylène aléatoire (rPP), le polypropylène isotactique (iPP), etc. Chaque type de polyoléfine a des propriétés spécifiques qui les rendent adaptés à des utilisations différentes.

II-4 Généralités sur les procédés de polymérisation :

II-4-1 Définition de polymérisation :

La polymérisation est le processus chimique par lequel de petites molécules, appelées monomères, se combinent de manière répétée pour former de longues chaînes appelées polymères. Cela se produit par des réactions chimiques appelées réactions de polymérisation. La polymérisation peut être réalisée par différents mécanismes et procédés, en fonction des monomères utilisés et des conditions de réaction.[32]

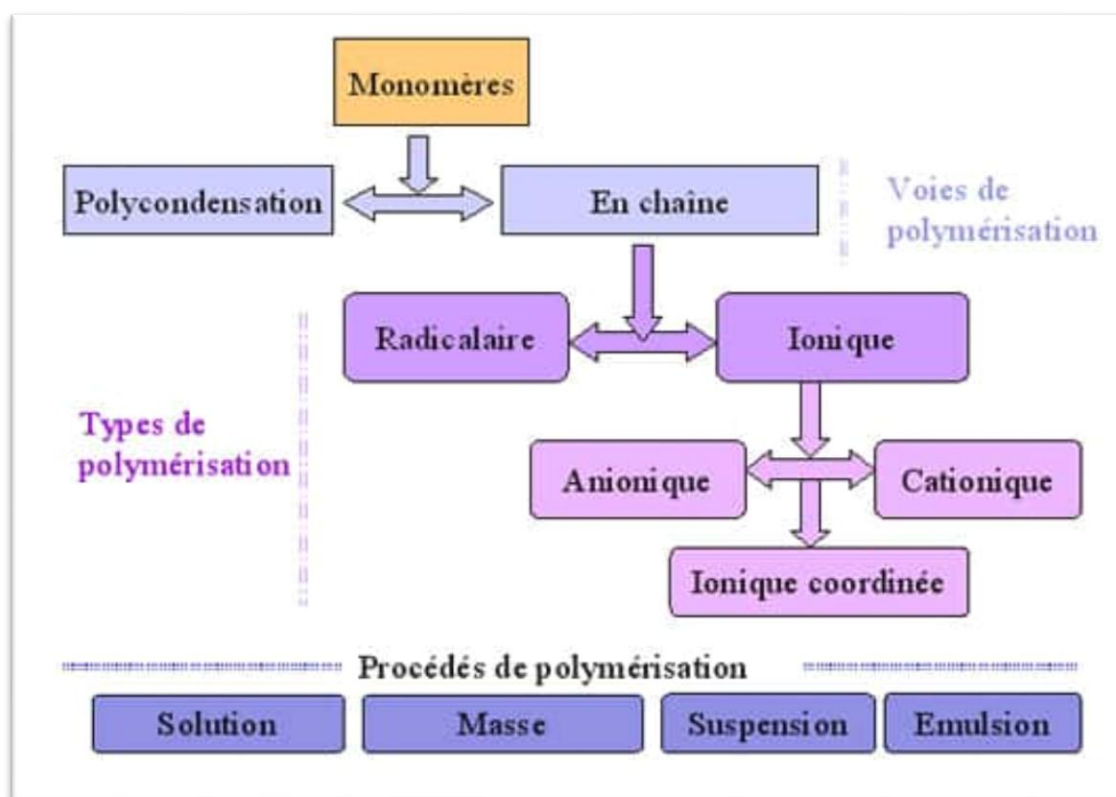


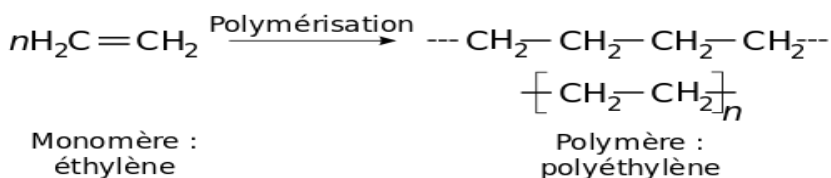
Figure II-1 : Voies, types et procédés de polymérisation.

II-4-2 Réaction de polymérisation :

On distingue généralement deux types principaux de polymérisation : les polymérisations en chaîne, également appelées polyaddition, et les polymérisations par étapes, également connues sous le nom de polycondensation. Voici une brève explication de chaque type [32] :

II-4-2-1 Polymérisation par addition (en chaîne):

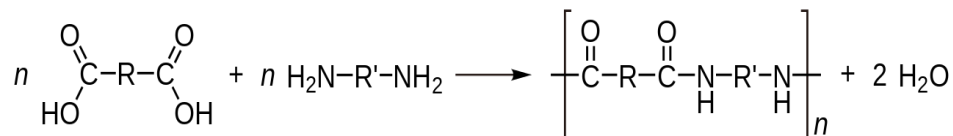
Dans ce type de polymérisation, les monomères s'assemblent en formant des liaisons covalentes sans élimination de petites molécules. La polymérisation par addition se produit généralement avec des monomères insaturés, tels que les oléfines. Les liaisons doubles ou triples présentes dans les monomères sont rompues, et les monomères s'assemblent en ajoutant des unités de monomère les unes après les autres. C'est le mécanisme de polymérisation couramment utilisé pour produire des polyoléfines telles que le polyéthylène et le polypropylène.



Polymérisation en chaîne

II-4-2-2 Polymérisation par condensation (par étape):

Dans ce type de polymérisation, les monomères réagissent en éliminant une petite molécule, généralement de l'eau,[33] [34] pour former des liaisons covalentes. La polymérisation par condensation se produit lorsque les monomères contiennent des groupes fonctionnels réactifs, tels que les groupes hydroxyle (OH) ou les groupes carboxyle (COOH). Lorsque ces groupes réagissent, une liaison covalente est formée entre les monomères et une petite molécule (comme l'eau) est éliminée. Les polymères formés par ce mécanisme comprennent des exemples tels que les polyesters et les polyamides.



Polymérisation par étape (synthèse d'un polyamide)

II-4-3 Mécanisme réactionnel des procédés de polymérisation :

Les mécanismes réactionnels des procédés de polymérisation peuvent varier en fonction du type de polymérisation utilisé. Voici une explication générale des mécanismes réactionnels des deux types principaux de polymérisation : la polymérisation en chaîne et la polymérisation par étapes.

II-4-3-1 Mécanisme réactionnel de polymérisation en chaîne :

a)- Polymérisation radicalaire :

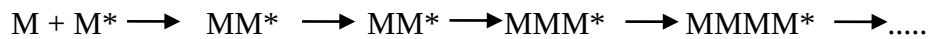
Ce mécanisme implique l'initiation d'une réaction par la formation de radicaux libres, généralement par des initiateurs tels que des peroxydes ou des azo-composés. Les radicaux libres réagissent avec des monomères insaturés, tels que des alcènes, des alcynes ou des diènes, en formant des liaisons covalentes et en créant de nouveaux radicaux libres, cette polymérisation se déroule en 3 étapes : l'amorçage, la propagation et la terminaison. Ce processus se répète jusqu'à ce que les monomères soient épuisés ou que la réaction soit stoppée.[35]

- **Etape 1 (Amorçage) :** $A + M \longrightarrow M^*$

L'amorçage de la polymérisation commence par l'activation d'une molécule de monomère à l'aide d'un amorceur, représenté par (A) dans l'équation. Lorsque l'amorceur réagit avec le monomère (M), il forme un monomère activé ou centre actif, noté (M*) dans l'équation. Cela crée une espèce réactive capable de réagir avec d'autres monomères et de démarrer la propagation de la polymérisation [36].

- **Etape 2 (Propagation) :** $M^* + M \longrightarrow MM^*$

Une fois que le monomère activé (M^*) est formé, il peut réagir avec d'autres molécules de monomère non réactives (M) pour poursuivre la réaction en chaîne. La réaction de propagation se produit lorsque (M^*) réagit avec (M) pour former une nouvelle unité de polymère, et le centre actif se transfère à cette nouvelle unité. Ce processus se répète de manière itérative, permettant à la chaîne de polymère de se développer et de se propager de cette forme d'équation:



- **Etape 3 (Terminaison) :**

La terminaison de la polymérisation se produit lorsque la réaction de propagation cesse. Cela peut se produire de différentes manières, par exemple par l'épuisement des monomères réactifs, la réaction entre deux centres actifs ou l'inhibition de la réaction par des agents appropriés. La terminaison conduit à la fin de la formation de nouvelles chaînes de polymère et à la stabilisation du système polymérique. [37]

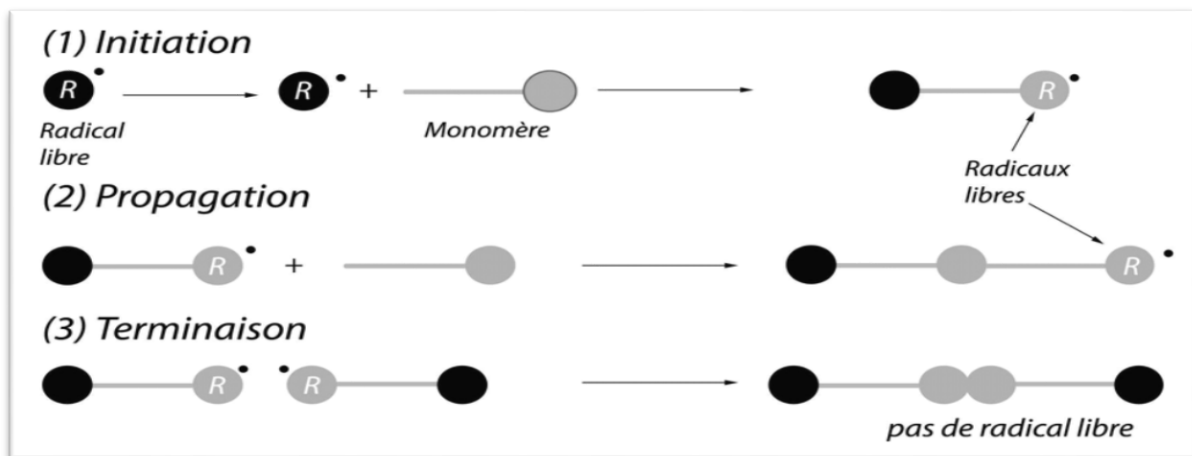
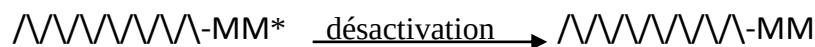


Figure II.2 : Polymérisation radicalaire [38]

b)- Polymérisation ionique :

Dans la polymérisation ionique, il s'agit effectivement d'une polymérisation d'addition où les extrémités de chaîne en croissance portent une charge électrique, soit positive (cationique) soit négative (anionique). De plus, contrairement à la polymérisation radicalaire où l'amorceur est généralement un radical, dans la polymérisation ionique, l'amorceur est un ion, soit un cation soit un anion.[39]

- **polymérisation anionique:** est un processus de polymérisation dans lequel les monomères réagissent avec des ions anions pour former des chaînes polymères [40]

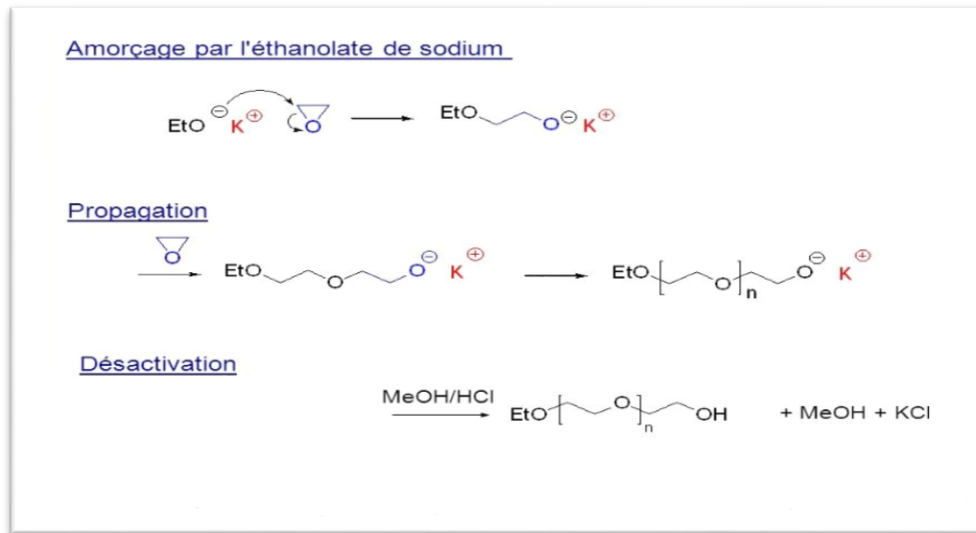
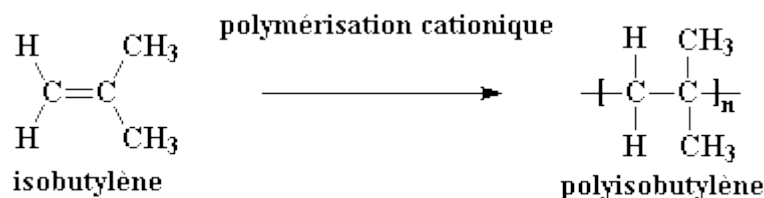


Figure II-3 : Polymérisation Anionique d'oxyde d'éthylène

- **polymérisation cationique:** est un type de polymérisation dans lequel les monomères réagissent avec des ions cations pour former des chaînes polymères.



c)- Polymérisation par coordination :

La polymérisation par coordination est un type de polymérisation qui se produit grâce à la coordination entre un catalyseur métallique et les monomères. Elle est largement utilisée pour la polymérisation de certains monomères, tels que les alcènes (éthylène, propylène) et les alcynes. Elle est utilisée dans de nombreuses applications industrielles, telles que la production de polyéthylène

de haute densité (HDPE), de polypropylène, de caoutchoucs synthétiques et d'autres polymères de spécialité. Les catalyseurs utilisés sont généralement des complexes de métaux de transition. Ces complexes contiennent des ligands organiques qui permettent la coordination et l'activation des monomères.[41]

- **Catalyseurs de type Ziegler-Natta :**

Les catalyseurs de type Ziegler-Natta sont utilisés pour la polymérisation de l'éthylène, du propylène et d'autres alcènes. Ils sont constitués d'un catalyseur métallique, généralement à base de titane ou de zirconium, associé à un co-catalyseur tel qu'un composé d'aluminium. C'est le même principe avec les Catalyseurs métallocènes. [42]

II-4-3-2 Mécanisme réactionnel de polymérisation par étape :

a)- Polymérisation par ouverture de cycle:

Ce procédé de polymérisation est utilisé pour la production de polymères cycliques tels que le polyéthylène glycol (PEG) et le polycaprolactone (PCL). Il implique la réaction d'un monomère cyclique, généralement une lactone ou un carbonate cyclique, avec un initiateur approprié pour former une chaîne polymère.

b)- Polymérisation par ouverture de groupes fonctionnels :

Ce procédé est utilisé pour produire des polymères fonctionnels, tels que les polymères acryliques et les polyesters fonctionnels. Il implique la polymérisation de monomères contenant des groupes fonctionnels réactifs, tels que les acrylates, les méthacrylates, les esters d'acide adipique, etc.

II-4-4 Procédés de Polymérisation:

La polymérisation peut être réalisée par divers procédés, tels que la polymérisation en masse, la polymérisation en solution, la polymérisation en émulsion et la polymérisation en suspension. Chaque procédé a ses propres avantages et est adapté à différentes applications et types de polymères.[43]

II-4-4-1 Procédé en masse :

Dans ce procédé, les monomères sont mélangés et chauffés jusqu'à ce qu'ils fondent pour former une masse homogène. La réaction de polymérisation se produit ensuite dans cette masse fondue, formant un polymère solide. Ce procédé est souvent utilisé pour les polymères thermoplastiques.[43]

II-4-4-2 Procédé en solution :

Les monomères sont dissous dans un solvant approprié pour former une solution. Un initiateur est ajouté à la solution, et la réaction de polymérisation se produit. Ce procédé est couramment utilisé pour la production de polymères tels que le polystyrène et le polyacrylonitrile.[44]

II-4-4-3 Procédé en émulsion :

Dans ce procédé, les monomères sont dispersés dans un milieu aqueux avec l'aide d'un agent émulsifiant. Des agents tensioactifs sont utilisés pour stabiliser les gouttelettes de monomères dans l'eau. L'émulsion est ensuite chauffée et un initiateur est ajouté pour déclencher la réaction de polymérisation.[45] Ce procédé est souvent utilisé pour la production de polymères tels que le PVC et le latex.

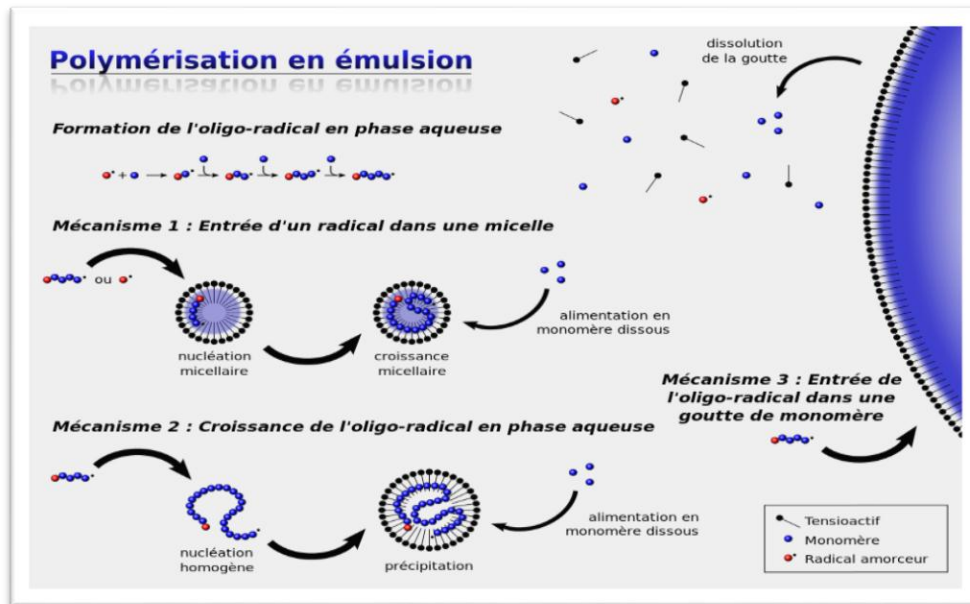


Figure II-4 polymérisation en émulsion [46]

II-4-4-4 Procédé en suspension :

Dans ce procédé, les monomères sont dispersés sous forme de gouttelettes dans un milieu aqueux à l'aide d'un agent suspensif. Un initiateur est ajouté pour démarrer la réaction de polymérisation. Ce procédé est couramment utilisé pour la production de polymères tels que le polypropylène et le polyéthylène.

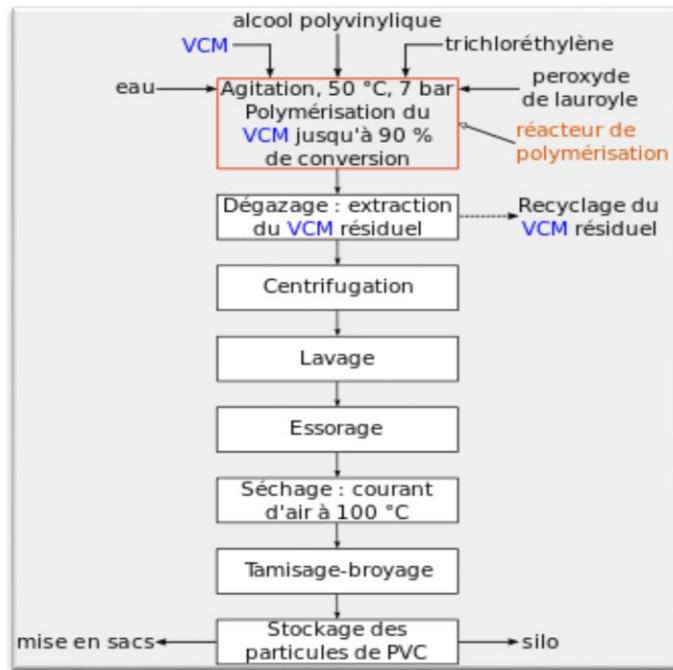


Figure II-5 polymérisation en suspension (production du PVC)[47]

En fin de compte, la polymérisation est un processus clé dans la production de polymères, permettant de créer des matériaux aux propriétés physiques et chimiques uniques, qui sont largement utilisés dans de nombreux domaines, tels que l'industrie, l'emballage, l'automobile, l'électronique, la médecine, et bien d'autres.

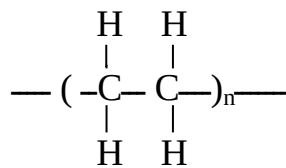
II-5 Les grandes catégories des polyoléfines :

II-5-1 Polyéthylène (PE) :

a)- Structure de polyéthylène :

Le polyéthylène est un polymère linéaire qui est constitué de répétitions de l'unité de monomère éthylène (C₂H₄). La structure chimique du polyéthylène est relativement simple, avec une chaîne principale composée d'atomes de carbone reliés par des liaisons simples.

Voici la représentation simplifiée de la structure du polyéthylène :[30]



Polyéthylène

CHAPITRE II : Les Polyoléfines

Chaque atome de carbone de la chaîne est lié à deux atomes d'hydrogène et à deux autres atomes de carbone adjacents par des liaisons simples. Cette structure linéaire se répète pour former une longue chaîne polymère.

La structure du polyéthylène lui confère des propriétés telles que la résistance à l'abrasion, la résistance chimique, la légèreté, la flexibilité et la facilité de transformation. Ces caractéristiques en font l'un des polymères les plus utilisés dans de nombreuses applications industrielles et domestiques, notamment l'emballage, les sacs en plastique, les tuyaux, les fils et câbles électriques, les revêtements et bien d'autres.

b)- Types de polyéthylène :

Il existe plusieurs types de polyéthylène, qui se distinguent par leurs structures moléculaires et leurs propriétés spécifiques. Voici les principaux types de polyéthylène [30][31] :

- **Polyéthylène haute densité (HDPE) :** Le HDPE est caractérisé par une structure linéaire et compacte. Il présente une grande densité, une excellente résistance à l'abrasion, une bonne résistance chimique et une faible perméabilité à l'eau et aux gaz. Il est couramment utilisé dans les applications nécessitant une résistance mécanique élevée, telles que les réservoirs de stockage, les tuyaux d'eau et de gaz, les conteneurs, les bouteilles, etc.

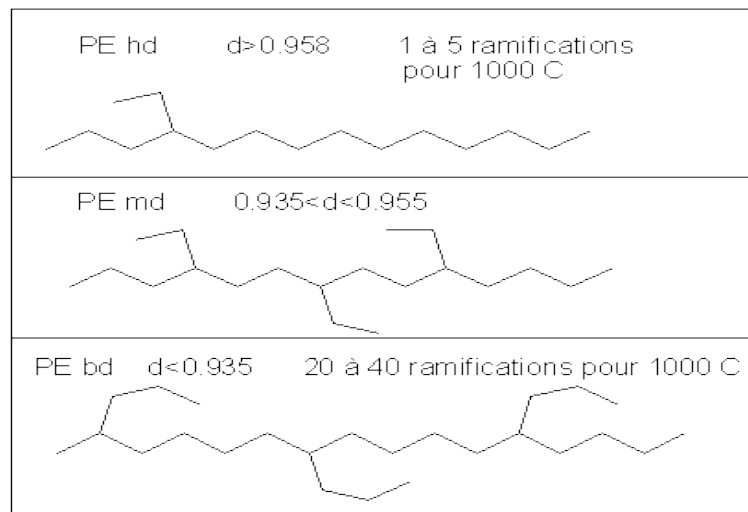


Figure II-6 : Différentes formes de polyéthylène

- **Polyéthylène basse densité (LDPE) :** Le LDPE est caractérisé par une structure plus ramifiée et moins linéaire que le HDPE. Il présente une plus grande flexibilité, une plus grande résistance aux chocs et une plus faible densité. Le LDPE est utilisé dans les films plastiques, les emballages souples, les sacs en plastique, les revêtements, les jouets, etc.

- **Polyéthylène linéaire basse densité (LLDPE) :** Le LLDPE est une variante du LDPE, avec une structure linéaire légèrement ramifiée. Il combine les caractéristiques du LDPE et du HDPE, offrant une bonne résistance aux chocs, une flexibilité élevée et une résistance aux perforations. Le LLDPE est utilisé dans les films étirables, les sacs en plastique, les revêtements, les enveloppes d'emballage, etc.
- **Polyéthylène ultra haute densité (UHMWPE) :** L'UHMWPE se distingue par une très haute masse molaire et une très faible densité. Il présente une excellente résistance à l'usure, une résistance aux chocs exceptionnelle, une faible friction et une bonne résistance chimique. Il est utilisé dans les applications nécessitant une résistance à l'abrasion élevée, telles que les revêtements de protection, les pièces d'usure, les implants médicaux, etc.
- **Polyéthylène réticulé (PEX) :** Le PEX est un polyéthylène qui a été réticulé, c'est-à-dire que ses chaînes polymères ont été interconnectées. Cela améliore sa résistance à la chaleur, à la pression et à la corrosion. Le PEX est couramment utilisé dans les systèmes de tuyauterie pour l'eau potable, le chauffage et le refroidissement, ainsi que dans les câbles électriques.

Chaque type de polyéthylène présente des propriétés et des applications spécifiques, ce qui les rend adaptés à différentes utilisations industrielles et commerciales.

c)- Propriétés de polyéthylène :

Le polyéthylène possède plusieurs propriétés remarquables qui en font un matériau très utilisé dans de nombreuses applications. Voici quelques-unes des principales propriétés du polyéthylène [30][31] :

- **Résistance à l'abrasion :** Le polyéthylène présente une excellente résistance à l'abrasion, ce qui le rend durable et adapté aux applications nécessitant une résistance aux frottements et à l'usure.
- **Résistance chimique :** Le polyéthylène est résistant à de nombreux produits chimiques, tels que les acides dilués, les bases, les solvants organiques et les produits chimiques couramment utilisés. Il est donc utilisé dans des environnements où une résistance chimique est requise.
- **Résistance à la corrosion :** En raison de sa résistance chimique, le polyéthylène est également résistant à la corrosion causée par des agents corrosifs tels que l'eau, les sels et les produits chimiques corrosifs.
- **Résistance à la rupture :** Le polyéthylène a une bonne résistance à la rupture, ce qui le rend capable de supporter des charges et des contraintes mécaniques élevées sans se rompre.

- **Résistance aux chocs** : Le polyéthylène présente une résistance élevée aux chocs, ce qui signifie qu'il peut absorber et dissiper efficacement l'énergie des impacts, le rendant approprié pour les applications nécessitant une résistance aux chocs, telles que les emballages de protection et les applications d'ingénierie.
- **Faible densité** : Le polyéthylène a une faible densité, ce qui le rend léger par rapport à de nombreux autres matériaux. Cela en fait un choix attrayant pour les applications où la légèreté est importante, telles que les emballages, les sacs et les composants automobiles.
- **Bonnes propriétés électriques** : Le polyéthylène a de bonnes propriétés électriques, telles qu'une faible constante diélectrique et une bonne résistance électrique. Il est donc utilisé dans les applications électriques et électroniques, comme les câbles et les isolants électriques.
- **Facilité de transformation** : Le polyéthylène est facilement transformable par divers procédés, tels que l'extrusion, le moulage par injection et le soufflage. Cela permet une grande variété de formes et de produits finaux.
- **Résistance aux intempéries** : Le polyéthylène est résistant aux intempéries, ce qui lui permet de maintenir ses propriétés mécaniques et sa stabilité chimique dans des conditions extérieures difficiles.
- **Hygiénique et non toxique** : Le polyéthylène est hygiénique et non toxique, ce qui le rend approprié pour les applications en contact avec les aliments, les produits pharmaceutiques et les produits de soins personnels.

Ces propriétés font du polyéthylène un matériau polyvalent et largement utilisé dans de nombreux secteurs industriels, tels que l'emballage, l'automobile, l'électronique, la construction, l'agriculture, la santé, etc.

II-5-2 Polypropylène (PP):

a)- Structure de polypropylène :

Le polypropylène (PP) est un polymère thermoplastique linéaire constitué de répétitions de l'unité de monomère propylène (C_3H_6). Sa structure chimique est relativement simple et se compose de chaînes principales composées d'atomes de carbone reliés par des liaisons simples.

Voici la représentation simplifiée de la structure du polypropylène [30][31] :



Polypropylène

Chaque atome de carbone de la chaîne principale est lié à deux atomes d'hydrogène et à un groupe méthyle (CH₃) ou à un atome de carbone adjacent par des liaisons simples. Cette structure linéaire se répète pour former une longue chaîne polymère.

Le polypropylène présente également des structures tactiques, qui se réfèrent à l'arrangement spatial des groupes méthyle (CH₃) sur la chaîne principale. Les principales structures tactiques du polypropylène sont :

- **Polypropylène isotactique** : Dans le polypropylène isotactique, tous les groupes méthyle (CH₃) sont orientés du même côté de la chaîne polymère. Cela confère au matériau des propriétés cristallines et une structure régulière, ce qui lui donne une plus grande rigidité et une meilleure résistance à la chaleur.
- **Polypropylène syndiotactique** : Dans le polypropylène syndiotactique, les groupes méthyle (CH₃) alternent leur orientation le long de la chaîne polymère. Cela donne au matériau une structure irrégulière et des propriétés amorphes, ce qui le rend plus flexible et plus résistant aux chocs.
- **Polypropylène atactique** : Dans le polypropylène atactique, les groupes méthyle (CH₃) sont répartis de manière aléatoire sur la chaîne polymère. Ce type de structure confère au matériau des propriétés amorphes et une faible cristallinité, ce qui le rend souple et élastique.

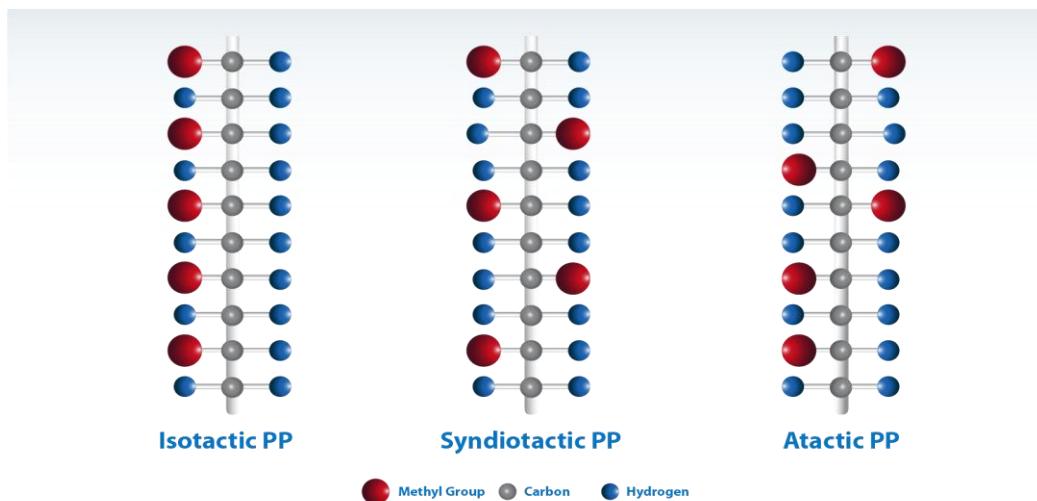


Figure II-7:Les principales structures atactiques du polypropylène[48]

La structure tactique du polypropylène influence ses propriétés physiques et mécaniques, telles que la rigidité, la flexibilité, la résistance aux chocs et la température de fusion.

Le polypropylène est largement utilisé dans de nombreux domaines, notamment l'emballage, l'automobile, les textiles, les produits de consommation, les dispositifs médicaux, etc., en raison de ses propriétés telles que la résistance chimique, la légèreté, la résistance à la chaleur, la rigidité et la facilité de transformation.

b)- Types de polypropylène :

Il existe plusieurs types de polypropylène (PP) qui diffèrent par leur structure et leurs propriétés. Les principaux types de polypropylène sont les suivants [30][31] :

- **Polypropylène homopolymère (PP-H) :** Le PP homopolymère est constitué uniquement de répétitions de l'unité de monomère propylène. Il présente une cristallinité élevée, une résistance mécanique élevée, une bonne résistance chimique et une faible absorption d'humidité. Il est couramment utilisé dans les applications nécessitant une rigidité, une résistance à la chaleur et une résistance chimique élevées, telles que les pièces automobiles, les tuyaux, les récipients chimiques, etc.

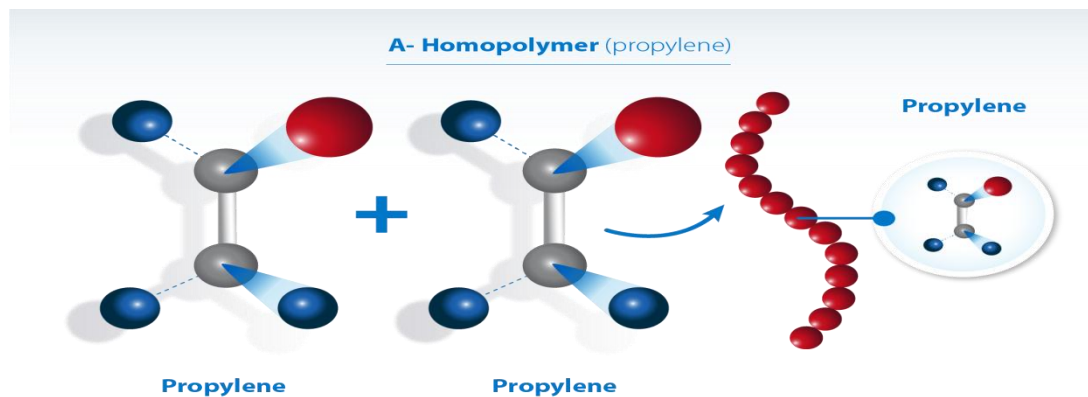


Figure II-8: Polypropylène homopolymère (PP-H)[48]

- **Polypropylène copolymère (PP-C) :** Le PP copolymère contient des unités de monomère de propylène ainsi que d'autres monomères, tels que de petites quantités d'éthylène. Cette incorporation de monomères supplémentaires modifie les propriétés du PP, lui conférant une plus grande flexibilité, une résistance aux chocs améliorée et une résistance à la fissuration. Le PP copolymère est utilisé dans les applications où la ténacité et la résistance aux chocs sont essentielles, comme les films, les bouchons, les contenants souples, etc.

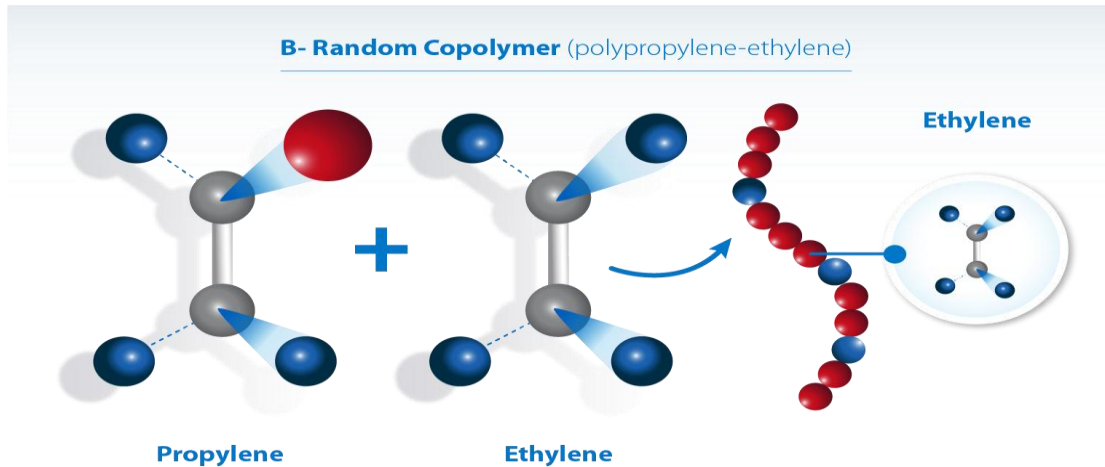


Figure II-9: Polypropylène copolymère (PP-C)[48]

- **Polypropylène aléatoire (PP-R)** : Le PP aléatoire est un type spécial de copolymère de propylène dans lequel les unités de monomère de propylène sont réparties de manière aléatoire le long de la chaîne polymère. Cela confère au PP-R des propriétés amorphes, une bonne résistance à la chaleur, une faible absorption d'eau et une excellente résistance chimique. Le PP-R est principalement utilisé dans les systèmes de tuyauterie pour l'eau chaude et froide, les systèmes de chauffage par le sol, etc.

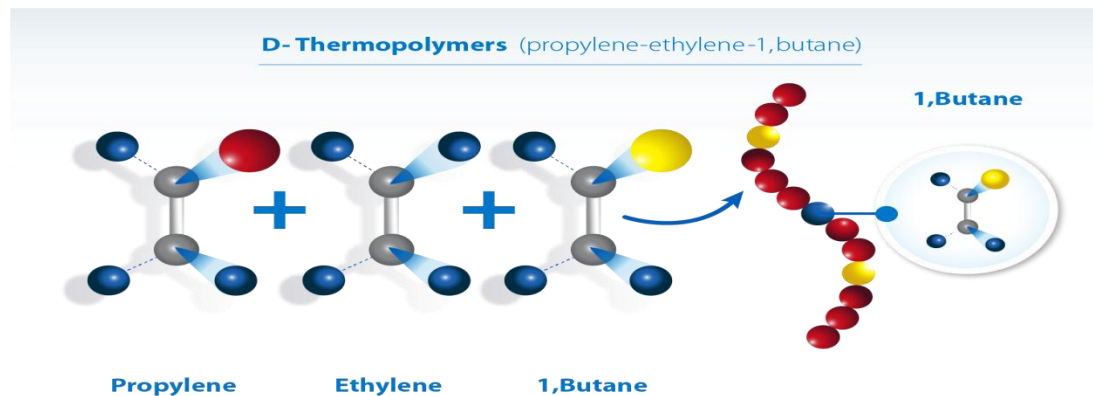


Figure II-10: Polypropylène aléatoire (PP-R)[48]

- **Polypropylène à impact élevé (PP-HE)** : Le PP à impact élevé est un mélange de PP homopolymère et de caoutchouc ou d'élastomère. Cette combinaison confère au matériau une résistance aux chocs supérieure, une grande ténacité et une flexibilité accrue. Le PP-HE est utilisé dans les applications nécessitant une résistance aux chocs élevée, telles que les pare-chocs automobiles, les boîtiers d'appareils électroménagers, etc.

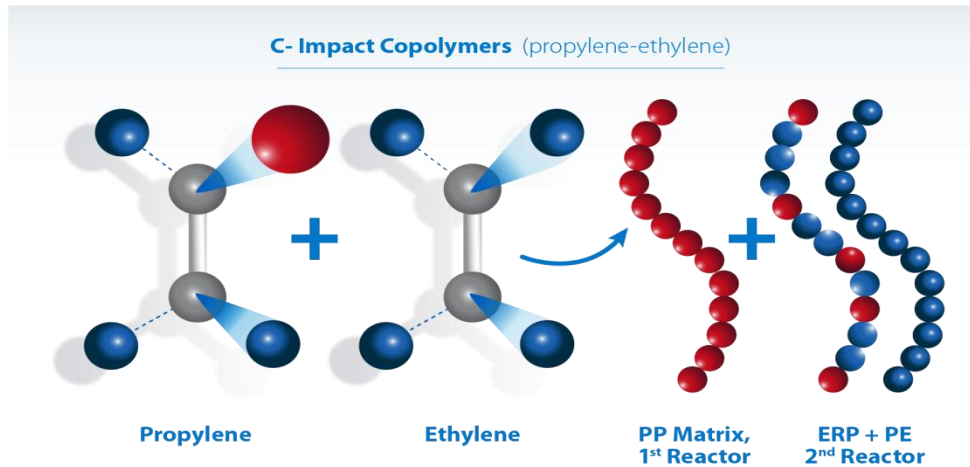


Figure II-11: Polypropylène à impact élevé (PP-HE)[48]

Il est important de noter que les différentes formulations de polypropylène peuvent être adaptées pour répondre à des exigences spécifiques en termes de propriétés mécaniques, de résistance chimique, de stabilité thermique, etc. Les fabricants de polypropylène peuvent également ajouter des additifs pour améliorer certaines caractéristiques du matériau, comme la résistance aux UV, la lubrification, la résistance au glissement, etc.

c)- Propriétés de polypropylène :

Le polypropylène (PP) possède plusieurs propriétés qui en font un matériau largement utilisé dans de nombreuses applications.[30][31]

Voici quelques-unes des principales propriétés du polypropylène :

- **Résistance mécanique :** Le polypropylène présente une bonne résistance mécanique, ce qui signifie qu'il est capable de résister à des charges et à des contraintes élevées sans se déformer ou se rompre facilement. Cela en fait un matériau robuste pour de nombreuses applications.
- **Résistance chimique :** Le polypropylène est résistant à de nombreux produits chimiques, tels que les acides dilués, les bases, les solvants organiques et les produits chimiques couramment utilisés. Il est donc utilisé dans des environnements où une résistance chimique est requise.
- **Résistance à la chaleur :** Le polypropylène présente une bonne résistance à la chaleur, pouvant supporter des températures élevées sans se déformer ou se ramollir. Cela le rend

adapté à des applications où la résistance à la chaleur est nécessaire, comme les pièces automobiles sous le capot, les contenants pour micro-ondes, etc.

- **Faible densité** : Le polypropylène a une faible densité, ce qui le rend léger par rapport à de nombreux autres matériaux. Cela en fait un choix attrayant pour les applications nécessitant une légèreté, comme les emballages, les composants automobiles et les produits de sport.
- **Résistance à l'humidité** : Le polypropylène a une faible absorption d'humidité, ce qui lui permet de conserver ses propriétés mécaniques et dimensionnelles même en présence d'humidité. Il est donc utilisé dans des environnements humides ou dans des applications où la résistance à l'humidité est importante.
- **Résistance aux chocs** : Le polypropylène présente une bonne résistance aux chocs, ce qui lui permet d'absorber et de dissiper l'énergie des impacts. Cela le rend approprié pour les applications nécessitant une résistance aux chocs, telles que les pare-chocs automobiles, les boîtiers d'appareils électroménagers, etc.
- **Isolant électrique** : Le polypropylène est un bon isolant électrique, ce qui le rend approprié pour les applications électriques et électroniques où une isolation électrique est nécessaire.
- **Facilité de transformation** : Le polypropylène est facile à transformer par des méthodes de transformation courantes telles que l'extrusion, le moulage par injection et le thermoformage. Cela lui confère une grande polyvalence et facilite son utilisation dans différentes applications.
- **Recyclabilité** : Le polypropylène est recyclable, ce qui en fait un matériau respectueux de l'environnement. Il peut être récupéré, transformé et réutilisé pour la fabrication de nouveaux produits.

Ces propriétés font du polypropylène un matériau polyvalent utilisé dans divers secteurs industriels, tels que l'emballage, l'automobile, l'électronique, les produits de consommation, l'industrie médicale, etc.

II-5-3 Polybutadiène :

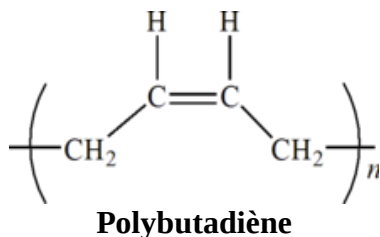
a)- Structure de polybutadiène:

Le polybutène est un polymère thermoplastique qui peut exister sous différentes formes en fonction de la structure de sa chaîne polymère. Le polybutène peut être classé en trois principaux types : le

CHAPITRE II : Les Polyoléfines

polybutène-1 (PB-1), le polybutène-2 (PB-2) et le polybutène-3 (PB-3). La structure de ces types de polybutène est la suivante [30][31] :

Polybutène-1 (PB-1) : Le PB-1 est un polymère constitué de répétitions de l'unité de monomère butène-1 (C₄H₈). Sa structure est linéaire et présente des chaînes principales composées d'atomes de carbone reliés par des liaisons simples. Voici une représentation simplifiée de la structure du PB-1 :

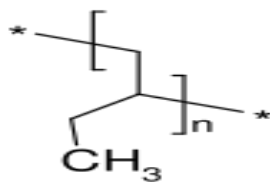


Chaque atome de carbone de la chaîne principale est lié à deux atomes d'hydrogène et à un groupe méthyle (CH₃) ou à un atome de carbone adjacent par des liaisons simples.

b)- Types de polybutadiène :

Le polybutène est principalement classé en trois types : polybutène-1 (PB-1), polybutène-2 (PB-2) et polybutène-3 (PB-3). Chacun de ces types de polybutène a des caractéristiques et des propriétés différentes. Voici une description de chaque type de polybutène :

- **Polybutène-1 (PB-1)** : Le polybutène-1 est un polymère produit à partir du monomère butène-1 (C₄H₈). Il est composé principalement de chaînes linéaires de monomères butène-1. Le PB-1 présente une cristallinité élevée, une résistance mécanique élevée et une bonne résistance chimique. Il est utilisé dans des applications telles que les tuyaux, les raccords, les films d'emballage, les fils et câbles, les revêtements, etc.



Polybutène-1 (PB-1)

- **Polybutène-2 (PB-2)** : Le polybutène-2 est un copolymère produit à partir d'un mélange de butène-1 (C₄H₈) et d'éthylène (C₂H₄). Il est constitué de chaînes copolymères comportant à la fois des unités de monomère butène-1 et des unités de monomère éthylène. Le PB-2 a une structure plus souple et plus amorphe par rapport au PB-1. Il présente une meilleure flexibilité et une plus grande résistance aux chocs. Il est utilisé dans des applications telles que les films d'emballage, les revêtements, les adhésifs, etc.

- **Polybutène-3 (PB-3) :** Le polybutène-3 est un copolymère produit à partir d'un mélange de butène-1 (C_4H_8) et de propylène (C_3H_6). Il est composé de chaînes copolymères contenant des unités de monomère butène-1 et des unités de monomère propylène. Le PB-3 présente une structure plus flexible et amorphe par rapport au PB-1. Il a une résistance aux chocs améliorée et une plus grande élasticité. Il est utilisé dans des applications telles que les films d'emballage, les revêtements, les adhésifs, les fibres, etc.

Il convient de noter que les différentes formulations de polybutène peuvent varier en termes de proportions de monomères, de poids moléculaire, d'additifs et de techniques de polymérisation utilisées. Cela permet de produire des grades spécifiques de polybutène avec des propriétés adaptées à des applications particulières.

c)- Propriétés de polybutadiène :

Le polybutène, sous ses différentes formes telles que le polybutène-1 (PB-1), le polybutène-2 (PB-2) et le polybutène-3 (PB-3), possède plusieurs propriétés intéressantes. Voici quelques-unes des principales propriétés du polybutène :

- **Résistance mécanique :** Le polybutène présente une bonne résistance mécanique, ce qui lui permet de résister aux contraintes et aux charges élevées sans se déformer ou se rompre facilement.
- **Résistance chimique :** Le polybutène est résistant à de nombreux produits chimiques, tels que les acides dilués, les bases, les solvants organiques et les agents corrosifs couramment utilisés. Il peut donc être utilisé dans des applications nécessitant une résistance chimique élevée.
- **Résistance à la chaleur :** Le polybutène a une bonne résistance à la chaleur, ce qui lui permet de conserver ses propriétés mécaniques à des températures élevées. Il peut être utilisé dans des applications nécessitant une stabilité thermique.
- **Résistance aux chocs :** Le polybutène présente une bonne résistance aux chocs, ce qui lui permet d'absorber les impacts et de résister aux contraintes mécaniques élevées sans se rompre facilement.
- **Flexibilité :** Le polybutène est un matériau flexible, ce qui le rend adapté à des applications où une certaine flexibilité est requise, comme les tubes et les tuyaux souples.

- **Faible densité** : Le polybutène a une faible densité, ce qui le rend plus léger que de nombreux autres polymères. Cela en fait un matériau attrayant pour des applications nécessitant une légèreté, comme les emballages.
- **Faible absorption d'eau** : Le polybutène a une faible absorption d'eau, ce qui lui permet de maintenir ses propriétés mécaniques et dimensionnelles même en présence d'humidité.
- **Isolation électrique** : Le polybutène est un bon isolant électrique, ce qui le rend approprié pour les applications électriques et électroniques où une isolation électrique est requise.
- **Recyclabilité** : Le polybutène est recyclable, ce qui en fait un matériau respectueux de l'environnement. Il peut être récupéré, recyclé et réutilisé pour la fabrication de nouveaux produits.

Ces propriétés font du polybutène un matériau polyvalent utilisé dans diverses applications telles que les tuyaux, les films d'emballage, les revêtements, les adhésifs, les fibres, etc.

CHAPITRE II : Les Polyoléfines

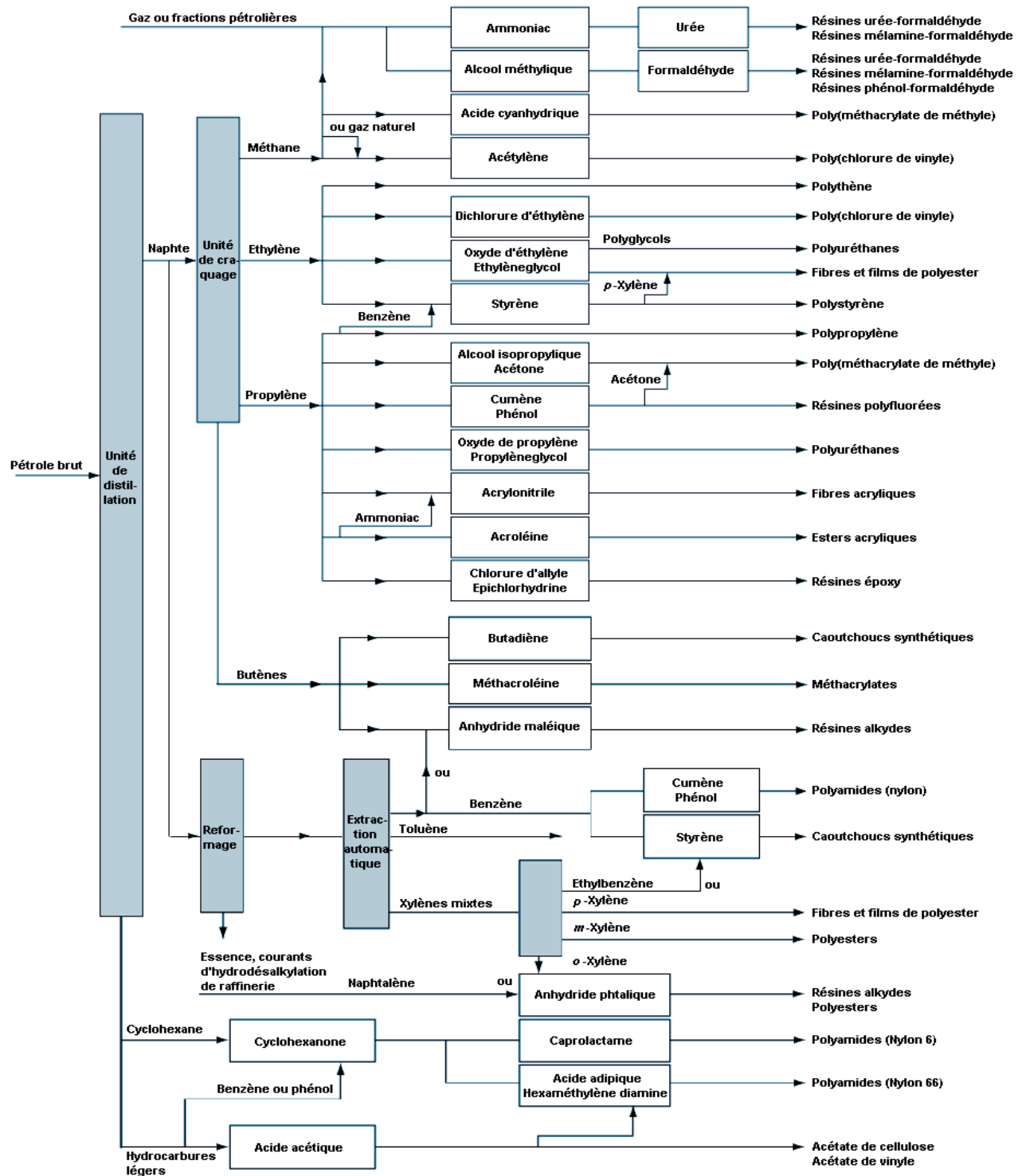


Figure II-12 : Schéma illustratif des différents procédés du pétrole au plastique [49]

CHAPITRE III
MISE EN ŒUVRE,
APPLICATION ET
RECYCLAGE DES
POLYOLIFINES

III-1 Procédés de mise en œuvre des polyoléfines :

Les polyoléfines, telles que le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP), peuvent subir différentes transformations pour être façonnées en divers produits. Voici quelques-unes des transformations courantes des polyoléfines :

III-1-1 Extrusion :

Les polyoléfines peuvent être extrudées pour former des produits tels que des tubes, des tuyaux, des films, des feuilles et des profilés. L'extrusion implique le chauffage de la matière première, qui est ensuite poussée à travers une filière pour obtenir la forme souhaitée [49]

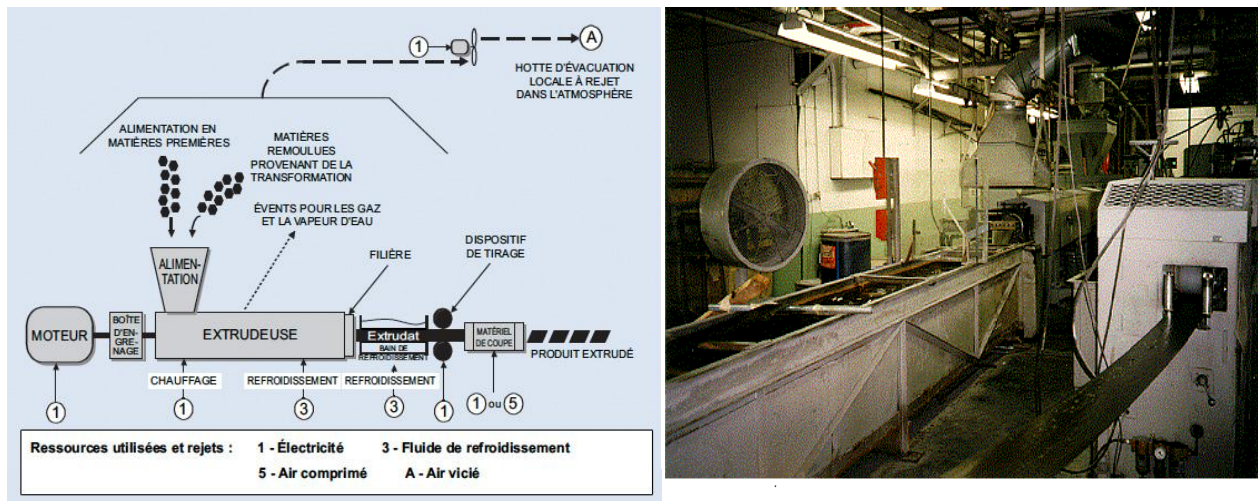


Figure III-1 : Procédé d'extrusion des polyoléfines [49]

III-1-2 Moulage par injection :

Le moulage par injection est un processus de fabrication utilisé pour produire des pièces en plastique en grande quantité. Il consiste à fondre un matériau plastique, à l'injecter dans un moule sous haute pression, puis à le refroidir et à le solidifier pour obtenir la pièce finale.

Cette méthode offre des avantages tels que la précision, la rapidité et la reproductibilité de la production, ainsi qu'une grande variété de matériaux plastiques utilisables. Le moulage par injection est largement utilisé dans de nombreux secteurs industriels, tels que l'automobile, l'électronique et l'emballage, grâce à sa polyvalence et à sa capacité à produire des pièces complexes [49].

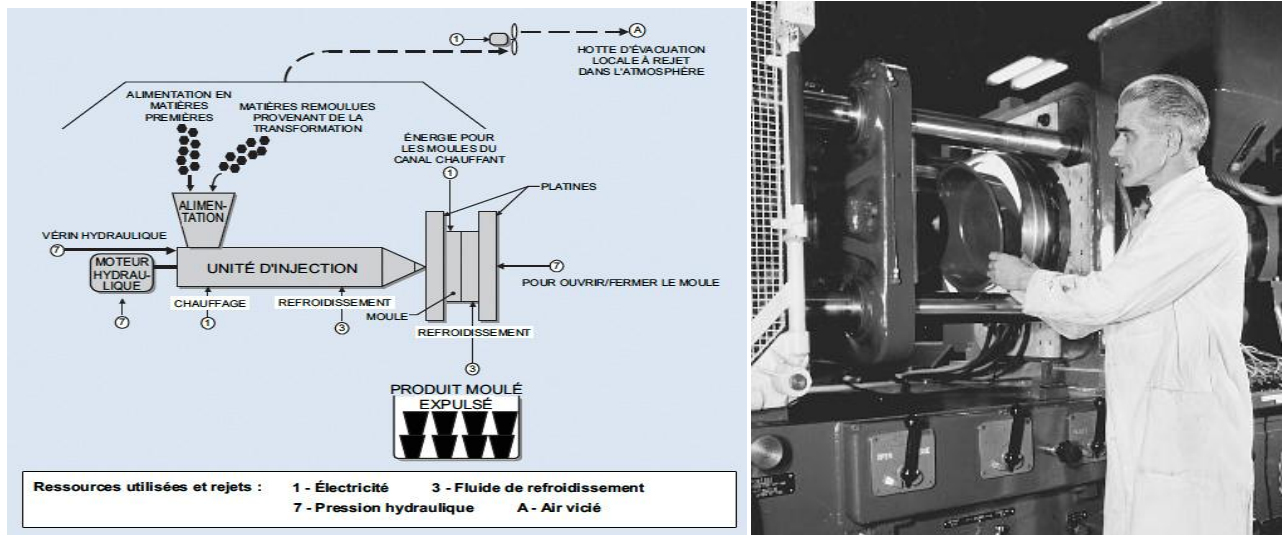


Figure III-2 : Procédé de moulage par injection [49]

III-1-3 Soufflage de films :

Le soufflage de films est un procédé de fabrication utilisé pour produire des films plastiques. Il implique la création d'une bulle de matière plastique fondue en soufflant de l'air dans un tube creux extrudé, suivi du refroidissement et de la solidification de la bulle pour former un film mince.

Ce procédé présente plusieurs avantages, notamment la possibilité de produire des films de différentes épaisseurs, dimensions et propriétés pour répondre aux besoins spécifiques des applications. Il est largement utilisé dans des secteurs tels que l'emballage alimentaire, l'industrie pharmaceutique et l'agriculture [49].

Le soufflage de films offre une efficacité élevée et des coûts relativement bas, permettant la production de films plastiques de qualité. De plus, il offre la flexibilité d'incorporer des caractéristiques spéciales, telles que la résistance aux UV ou la capacité de scellage.

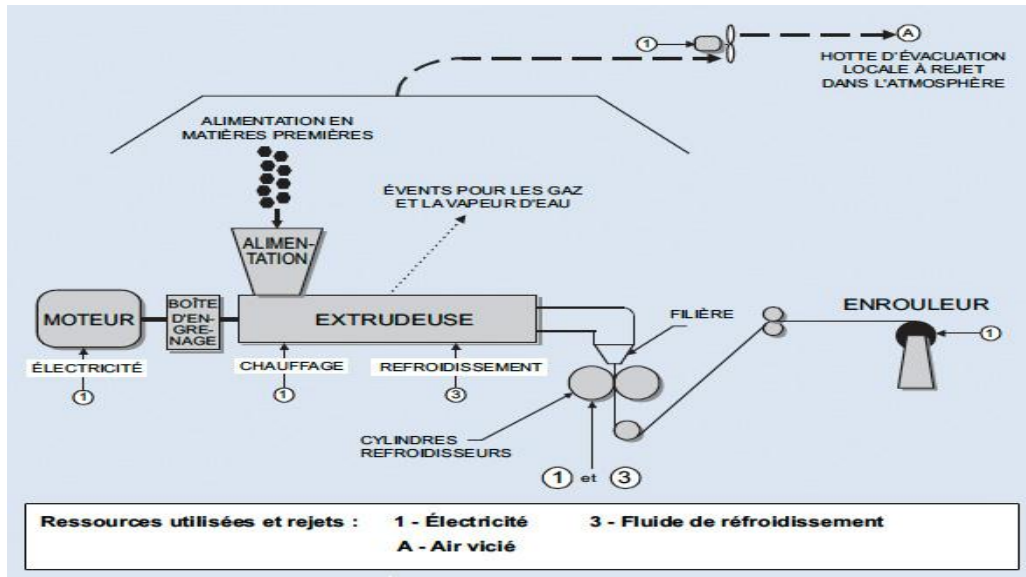


Figure III-3 : Procédé de soufflage de films [49]

III-1-4 Thermoformage :

Le thermoformage est un procédé de fabrication utilisé pour transformer des feuilles de plastique en produits finis en utilisant la chaleur et la pression. Il offre de nombreux avantages, tels qu'une grande flexibilité de conception, une production rapide et économique, ainsi que la possibilité d'utiliser une variété de matériaux plastiques. [50]

Le processus de thermoformage commence par le chauffage d'une feuille de plastique, qui est ensuite moulée sur un moule pour prendre la forme désirée. Une fois refroidie, la pièce thermoformée est retirée du moule et peut être finie selon les besoins.

Le thermoformage est largement utilisé dans des industries telles que l'emballage alimentaire, l'industrie médicale, l'automobile et l'électronique. Il permet de produire des emballages pratiques et esthétiques, des plateaux, des boîtiers et d'autres produits en plastique.

Ce procédé continue d'évoluer avec de nouvelles technologies pour répondre aux exigences croissantes en termes de durabilité, d'efficacité de production et de réduction des déchets. Il offre une solution polyvalente et efficace pour la fabrication de produits en plastique dans divers secteurs industriels.

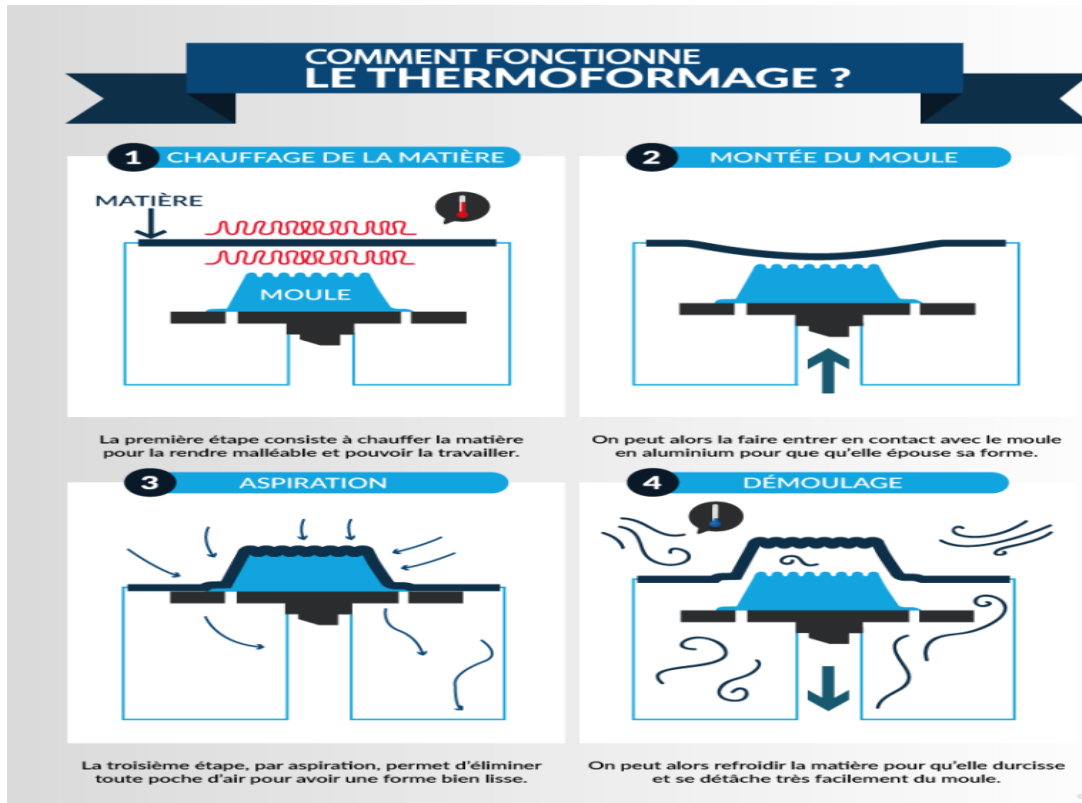


Figure III-4 : Procédé de Thermoformage [50]

III-1-5 Soudage :

Les polyoléfines peuvent être soudées ensemble pour créer des joints solides. Cela peut être réalisé par soudage à chaud, soudage par ultrasons, soudage par friction, soudage par vibration, etc. Le soudage permet d'assembler des pièces en polyoléfines et de créer des structures plus complexes.

III-1-6 Impression :

Les polyoléfines peuvent être imprimées à l'aide de différentes techniques d'impression, telles que l'impression flexographie, l'impression par sérigraphie et l'impression numérique. Cela permet d'ajouter des motifs, des logos ou des informations sur les produits en polyoléfines.

Il convient de noter que les polyoléfines peuvent également être recyclées pour être transformées en nouveaux produits, ce qui contribue à la durabilité environnementale de ces matériaux. Les techniques de transformation des polyoléfines peuvent varier en fonction de la nature spécifique du matériau et de l'application visée.

III-2 Statistiques sur les domaines d'application des polyoléfines :

Les polyoléfines sont un groupe de polymères thermoplastiques qui comprennent le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP). Ils sont largement utilisés dans une variété d'applications en raison de leurs excellentes propriétés physiques et chimiques. Voici quelques statistiques sur le domaine d'utilisation des polyoléfines :

- **Emballage :**

Les polyoléfines sont utilisées massivement dans l'industrie de l'emballage. Selon les statistiques, environ 40 à 45 % de la consommation mondiale de polyéthylène est utilisée pour la production de films plastiques d'emballage, de sacs, de sachets et de bouteilles en plastique. [51]

- **Industrie automobile :**

Les polyoléfines sont utilisées dans de nombreux composants automobiles, tels que les pare-chocs, les tableaux de bord, les réservoirs de carburant, les conduits de câblage et les pièces d'intérieur. Ces polymères représentent environ 15 % de la masse totale des matériaux utilisés dans une voiture moderne.

- **Tuyauterie :**

Les polyoléfines, en particulier le polyéthylène haute densité (PEHD), sont largement utilisées dans l'industrie des tuyaux en raison de leur résistance chimique, de leur durabilité et de leur légèreté. Elles sont utilisées dans les systèmes de distribution d'eau, les conduites de gaz, les câbles de communication souterrains, etc.

- **Textile :**

Les polyoléfines sont utilisées dans la fabrication de textiles non tissés, tels que les géotextiles, les textiles industriels, les revêtements de sol et les produits d'hygiène jetables.

- **Construction :**

Les polyoléfines sont utilisées dans l'industrie de la construction pour une variété d'applications telles que les films de construction, les membranes d'étanchéité, les isolants thermiques, les tuyaux d'égout, les revêtements de sol et les matériaux de toiture.

- **Électrique et électronique :**

Les polyoléfines sont utilisées dans l'industrie électrique et électronique pour la fabrication de câbles et de fils, de connecteurs, de boîtiers de composants et de diverses pièces isolantes.

- **Agriculture :**

Les polyoléfines sont utilisées dans l'agriculture pour la fabrication de serres, de bâches agricoles, de films de paillage et d'emballages pour produits agricoles.

Il convient de noter que ces statistiques peuvent varier en fonction de la région et de l'évolution des pratiques industrielles. Les polyoléfines continuent de trouver de nouvelles applications dans divers domaines grâce à leurs propriétés polyvalentes et à leur faible coût de production.

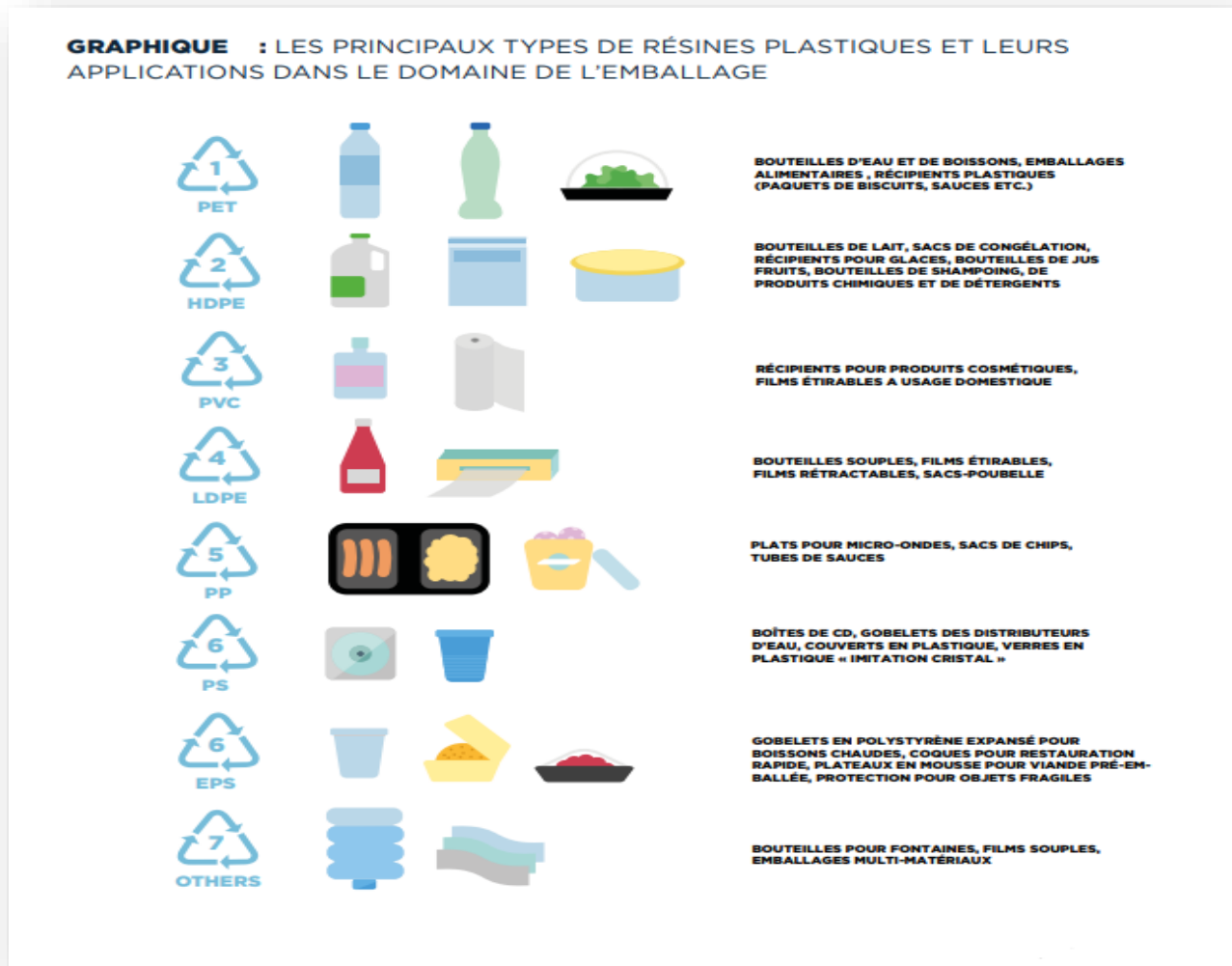


Figure III-5 : Applications des polyoléfines dans le domaine de l’emballage [52]

III-2-1 Statistiques sur la production et la consommation des polyoléfines :

Selon les données disponibles jusqu'en septembre 2021, la production mondiale des polyoléfines, notamment du polyéthylène (PE) et du polypropylène (PP), a connu une croissance significative au cours des dernières décennies. Toutefois, les chiffres exacts de la production mondiale peuvent varier d'une source à l'autre et évoluer au fil du temps en fonction des conditions du marché et des tendances économiques. [51]

En 2020, la production mondiale de polyoléfines s'est élevée à environ 212 millions de tonnes.

- Le polyéthylène (PE) représente la plus grande part de la production de polyoléfines, avec une production mondiale d'environ 110 millions de tonnes en 2020.
- Le polypropylène (PP) est le deuxième polymère le plus produit, avec une production mondiale d'environ 80 millions de tonnes en 2020.

En 2020, la consommation mondiale de polyoléfines était d'environ 206 millions de tonnes.

- Le polyéthylène est également le polymère le plus consommé, avec une consommation mondiale d'environ 110 millions de tonnes en 2020.
- Le polypropylène est le deuxième polymère le plus consommé, avec une consommation mondiale d'environ 75 millions de tonnes en 2020. [53]

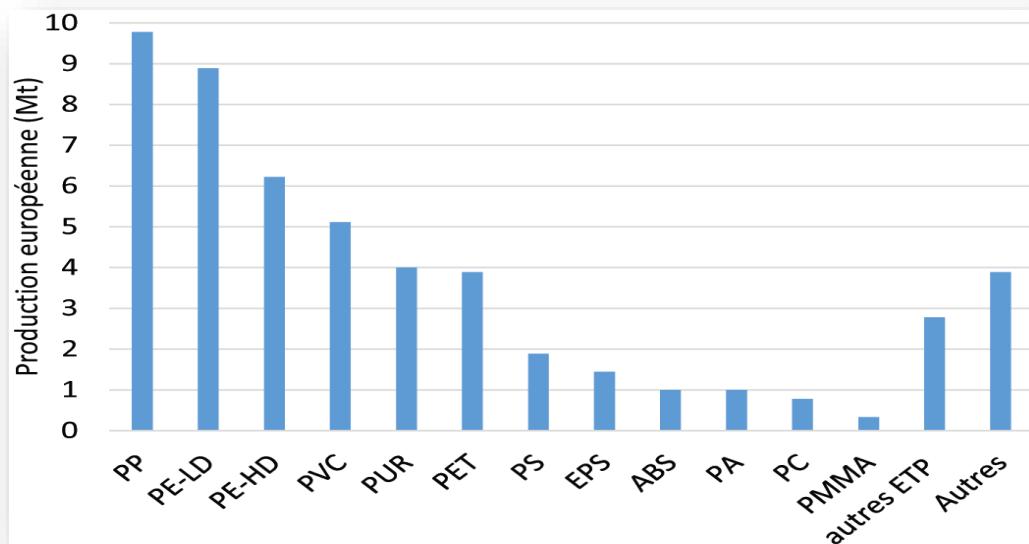


Figure III-6 : Demande européenne des polymères (ETP : « engineering thermoplastiques »)

En 2018, la demande européenne s'élevait à 51,2 millions de tonnes, principalement répartie entre les secteurs de l'emballage (40 %) et de la construction (20 %), suivis par l'automobile (10 %) et les équipements électriques et électroniques (6 %). Les polymères les plus utilisés étaient le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP), représentant près de 50 % de la demande totale, suivis par le polychlorure de vinyle (PVC), les polyuréthanes (PUR) et le poly téréphtalate d'éthylène.

Selon certaines projections et études, la production mondiale de plastiques a atteint environ 360 millions de tonnes par an. On estime également que cette production pourrait augmenter de manière significative et atteindre près de 1 milliard de tonnes d'ici 2050 si les tendances actuelles se maintiennent.

Ces chiffres témoignent de la croissance continue de la production et de la consommation de plastiques à l'échelle mondiale, avec des perspectives de développement significatives dans les secteurs de l'automobile et de l'électronique.

III-2-2 Répartition géographique :

L'Asie est la région qui produit et consomme le plus de polyoléfines, représentant une part importante de la production et de la consommation mondiales. La Chine est le plus grand producteur et consommateur de polyoléfines au monde.

L'Amérique du Nord et l'Europe sont également d'importants producteurs et consommateurs de polyoléfines.

Il est important de noter que ces chiffres sont basés sur des données jusqu'en 2021 et peuvent varier légèrement d'une source à l'autre. Les statistiques de production et de consommation des polyoléfines peuvent évoluer d'une année à l'autre en fonction des facteurs économiques, des tendances industrielles et des fluctuations de la demande mondiale. [53]

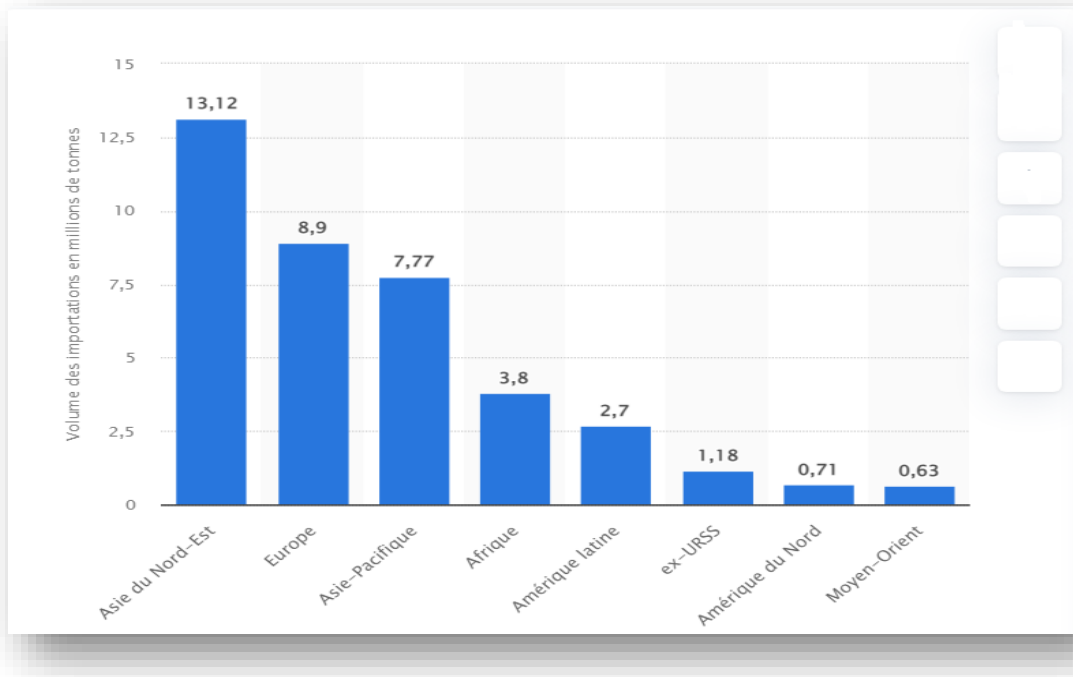


Figure III-7 : Statistique sur les besoins des polyoléfines par les régions du monde 2018[53]

Selon les statistiques, l'Asie du Nord-Est (Chine, Hong Kong, Japon, Corée du Nord, Corée du Sud, Taïwan) a importé plus de 13 millions de tonnes de polyoléfines en 2018. Ces pays sont connus pour leur forte demande de polyoléfines en raison de leur développement économique rapide et de leur secteur industriel dynamique.

III-3 Recyclage des polyoléfines :

Le recyclage des polyoléfines, tels que le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP), est un processus important pour réduire les déchets plastiques et favoriser une économie circulaire.

Voici quelques informations sur les étapes de recyclage des polyoléfines [54] :

➤ Collecte sélective :

Les polyoléfines peuvent être collectées sélectivement auprès des consommateurs dans le cadre des programmes de collecte sélective des déchets. Les déchets plastiques sont séparés des autres déchets et acheminés vers les installations de recyclage.

➤ Tri et séparation :

Les déchets plastiques sont triés et séparés en fonction de leur type (PE, PP, etc.) et de leur qualité. Cela permet de regrouper les polyoléfines similaires pour un recyclage plus efficace.

➤ **Broyage et lavage :**

Les déchets plastiques sont broyés en petits morceaux et lavés pour éliminer les impuretés telles que la saleté, les étiquettes et les résidus de produits. Le matériau plastique est ensuite séché.

➤ **Fusion et granulation :**

Les morceaux de plastique propres et secs sont fondus et transformés en granulés ou en paillettes. Cette étape permet d'obtenir des matériaux plastiques recyclés prêts à être réutilisés dans la fabrication de nouveaux produits.

➤ **Utilisation dans la fabrication :**

Les granulés de polyoléfines recyclées peuvent être utilisés comme matière première dans la fabrication de divers produits, tels que des films, des tuyaux, des profilés, des emballages, etc. Les polyoléfines recyclées peuvent être mélangées avec des polyoléfines vierges pour obtenir les propriétés requises.

➤ **Recyclage en boucle fermée :**

Les polyoléfines recyclées peuvent être réutilisées pour fabriquer des produits similaires à ceux d'origine, créant ainsi une boucle fermée de recyclage. Par exemple, des emballages en PE recyclé peuvent être transformés en nouveaux emballages en PE recyclé.

➤ **Recyclage en boucle ouverte :**

Dans certains cas, les polyoléfines recyclées peuvent également être utilisées dans d'autres applications, telles que les produits non alimentaires, les produits industriels ou les matériaux de construction.

Il convient de noter que le recyclage des polyoléfines peut présenter des défis, tels que la contamination des matériaux, la séparation des différents types de polyoléfines et la compatibilité avec les procédés de transformation existants. Cependant, des progrès continus sont réalisés dans le domaine du recyclage des polyoléfines pour maximiser leur récupération et leur réutilisation.

III-3-1 Effets des polyoléfines sur l'environnement :

Les polyoléfines, comme le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP), ont un certain impact sur l'environnement. Voici quelques effets à prendre en compte [54] :

➤ **Accumulation des déchets :**

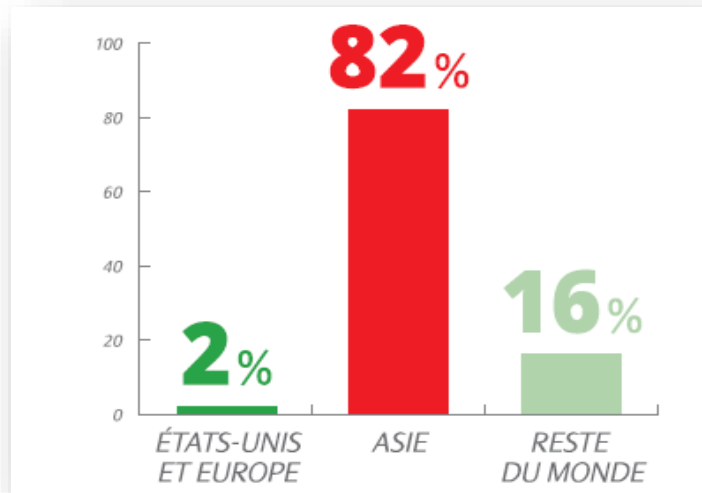
➤ Les polyoléfines sont largement utilisées et représentent une part importante des déchets plastiques. Leur accumulation dans les décharges et dans l'environnement peut contribuer à la pollution visuelle et à la problématique des déchets plastiques.

➤ **Dégradation lente :**

Les polyoléfines sont des polymères qui se dégradent très lentement dans l'environnement. Cela signifie que les déchets de polyoléfines peuvent rester dans l'environnement pendant de nombreuses années, contribuant ainsi à la pollution plastique.

➤ **Pollution marine :**

Lorsque les polyoléfines sont mal gérées, elles peuvent se retrouver dans les cours d'eau et finalement dans les océans, causant la pollution marine. Les polyoléfines peuvent nuire à la vie marine en étouffant les animaux marins ou en étant ingérées par les organismes, ce qui peut avoir des conséquences néfastes sur les écosystèmes marins. [55]



Figures III-8 : Impact des plastiques sur les océans (pollution)[55]

➤ **Émissions de gaz à effet de serre :**

La production de polyoléfines à partir de matières premières fossiles nécessite de l'énergie et peut entraîner des émissions de gaz à effet de serre, contribuant au changement climatique. De plus, lorsqu'elles sont incinérées ou dégradées dans des conditions anaérobies, les polyoléfines peuvent libérer du méthane, un puissant gaz à effet de serre.

➤ **Impact sur les écosystèmes terrestres :**

L'accumulation de déchets de polyoléfines dans les écosystèmes terrestres peut perturber les habitats naturels, affecter la faune et la flore locale, et altérer les cycles biogéochimiques.

Cependant, il est également important de noter que les polyoléfines présentent certains avantages environnementaux par rapport à d'autres matériaux. Ils sont légers, résistants, polyvalents et peuvent contribuer à la réduction de poids et d'émissions dans les applications telles que l'emballage et l'automobile.

Pour minimiser les effets négatifs des polyoléfines sur l'environnement, il est essentiel de promouvoir le recyclage des plastiques, de mettre en place une gestion adéquate des déchets, de favoriser l'utilisation de polyoléfines recyclées, d'encourager l'innovation dans les matériaux alternatifs et de sensibiliser à une consommation responsable.

III-3-2 Types de recyclage des polyoléfines :

Il existe plusieurs types de recyclage des polyoléfines, qui permettent de récupérer et de réutiliser ces matériaux plastiques.

Voici quelques-uns des principaux types de recyclage de polyoléfines [56] :

a) - Recyclage mécanique :

Il s'agit du type le plus courant de recyclage des polyoléfines. Le plastique est collecté, trié, broyé et nettoyé pour éliminer les impuretés. Ensuite, il est fondu et extrudé pour former de nouveaux produits en plastique, tels que des films, des tuyaux, des feuilles, des profilés, etc. Le recyclage mécanique conserve généralement les propriétés physiques du matériau d'origine, mais il peut y avoir une légère dégradation des propriétés mécaniques.

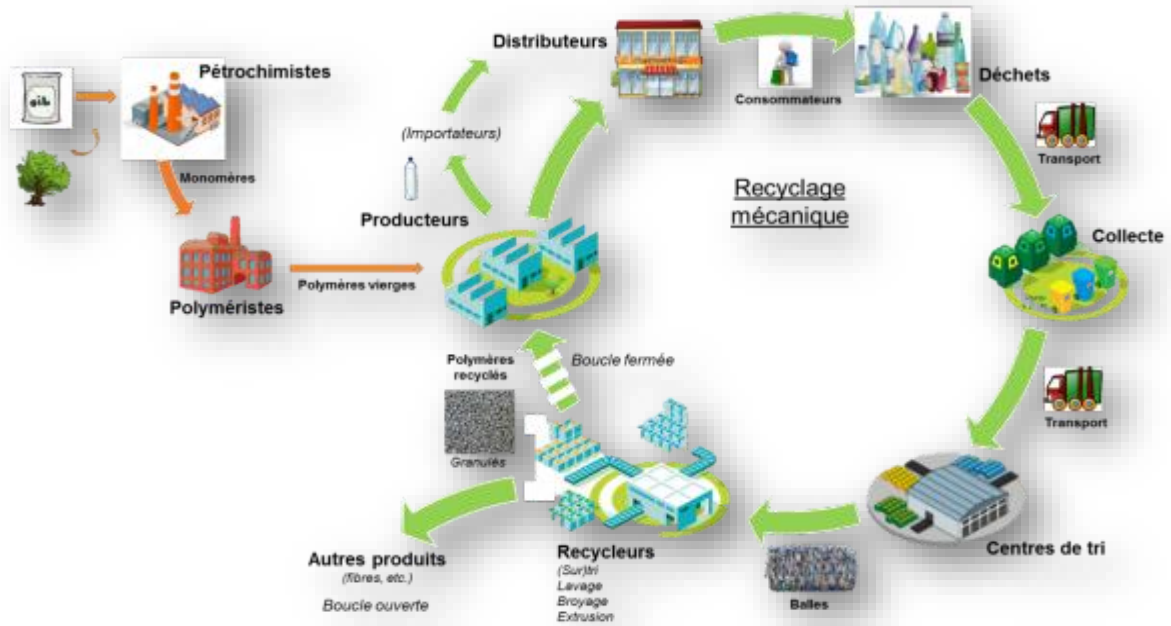


Figure III-9 : Schéma simplifié de recyclage mécanique des déchets post-consommation

b) - Recyclage chimique :

Il s'agit d'un processus plus complexe qui implique la dépolymérisation des polyoléfines en leurs monomères de base. Les polyoléfines sont décomposées en présence de réactifs chimiques ou de catalyseurs pour obtenir des monomères, qui peuvent ensuite être utilisés pour synthétiser de nouveaux polymères ou d'autres produits chimiques. Le recyclage chimique peut permettre de récupérer des matériaux de haute qualité et de réduire la dégradation des propriétés du matériau d'origine [56].

c)- Recyclage énergétique :

Lorsque les polyoléfines ne peuvent pas être recyclées mécaniquement ou chimiquement en raison de leur qualité ou de leur contamination, elles peuvent être utilisées comme source d'énergie dans des installations de valorisation énergétique. Les polyoléfines sont brûlées pour produire de la chaleur ou de l'électricité. Cependant, il est important de noter que le recyclage énergétique ne permet pas de récupérer les matériaux plastiques pour une réutilisation ultérieure.

d)- Recyclage en boucle fermée :

Ce type de recyclage implique la collecte et la réutilisation des polyoléfines pour fabriquer des produits similaires à ceux d'origine. Par exemple, des bouteilles en polyéthylène recyclé peuvent être transformées en nouvelles bouteilles en polyéthylène recyclé. Le recyclage en

boucle fermée permet de maximiser la valorisation des matériaux plastiques sans avoir à utiliser de nouvelles matières premières.

Il est important de noter que certains types de polyoléfines, tels que le polyéthylène haute densité (PEHD) et le polypropylène (PP), sont plus largement recyclés que d'autres types, en raison de leur disponibilité, de leurs propriétés et de leur demande sur le marché du recyclage.

III-3-3 Statistiques sur le recyclage des polyoléfines :

➤ Taux de recyclage des déchets plastiques :

Le taux de recyclage des déchets plastiques varie considérablement selon les pays et les régions. Dans de nombreux pays développés, le taux de recyclage des plastiques se situe généralement entre 20 et 40 %, bien qu'il puisse être plus élevé pour certains types de plastiques spécifiques. [55]

➤ Taux de recyclage des polyoléfines :

Les taux de recyclage spécifiques des polyoléfines, tels que le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP), peuvent également varier selon les régions. Dans certains cas, les taux de recyclage des polyoléfines peuvent être plus élevés que la moyenne générale des plastiques, en raison de leur demande sur le marché du recyclage et de leur utilisation répandue.

➤ Évolution du recyclage :

Au cours des dernières décennies, la conscience de l'importance du recyclage a augmenté et des efforts ont été déployés pour améliorer les infrastructures de recyclage et promouvoir des pratiques de recyclage plus efficaces. Cela a conduit à une augmentation progressive des taux de recyclage dans de nombreux pays.

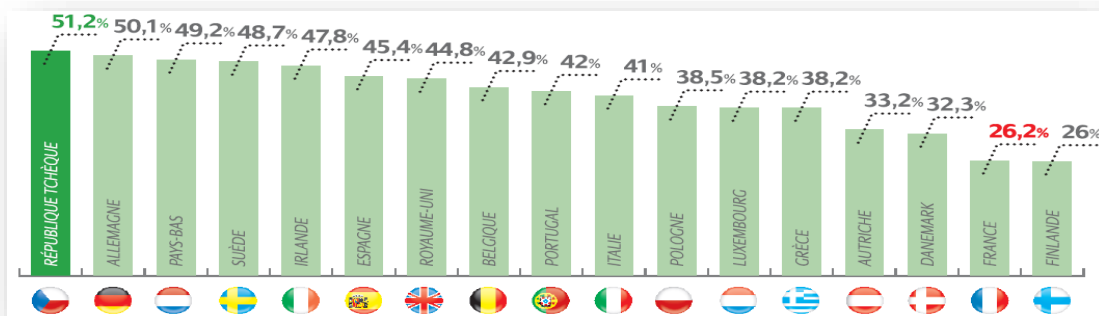


Figure III-10 : Taux de recyclage des emballages plastiques en Europe 2016 [55]

A decorative rectangular border with ornate, symmetrical scrollwork and floral motifs in a dark red or maroon color, framing the central text.

CONCLUSION GENERALE

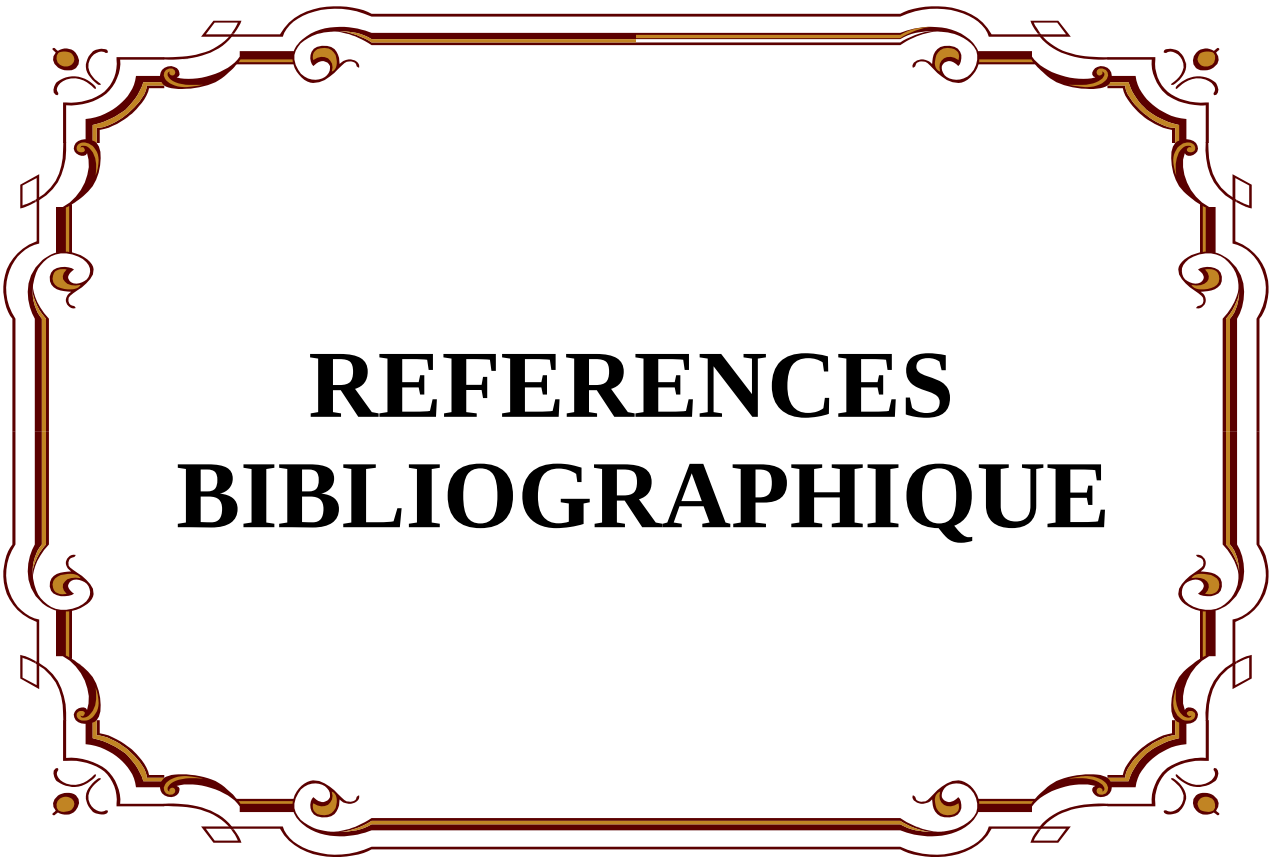
Conclusion Générale

En conclusion, les oléfines, en particulier l'éthylène, le propylène et le butylène, jouent un rôle essentiel dans l'industrie pétrochimique en tant que précurseurs de nombreux produits chimiques, plastiques et polymères qui sont omniprésents dans notre vie quotidienne.

Leur production à grande échelle grâce à des procédés comme le vapocraquage est un pilier de l'économie mondiale. Cependant, il est impératif de prendre en compte les défis environnementaux posés par la production et l'utilisation de polyoléfines et d'autres produits dérivés des oléfines.

La croissance continue de la demande mondiale impose la nécessité de développer des installations de production de pointe, tout en s'efforçant de minimiser l'impact environnemental en adoptant des méthodes de recyclage et en encourageant la production de plastiques respectueux de l'environnement.

En fin de compte, les oléfines représentent une force motrice de l'industrie moderne, mais elles nous rappellent également l'importance de l'innovation, de la durabilité et de la responsabilité environnementale dans notre quête de répondre aux besoins croissants de notre société tout en préservant notre planète pour les générations futures.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

Références bibliographiques :

- [1] : <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Karl-Ziegler.html>, Cité le 14-05-2023
- [2] : Pierre-François Thomas , Précis de physique-chimie: cours et exercices ; 2006
- [3] : Dupuis, G. x, Alcènes et autres composés éthyléniques.2006
- [4] :Masse molairecalculéed'après « Atomic weights of the elements 2007 » [archive], sur www.chem.qmul.ac.uk.
- [5] : W. M Haynes, Handbook of chemistry and physics, Boca, CRC, 2010-2011, 91e éd.,
- [6] :Entrée « Propene » dans la base de données de produits chimiques GESTIS de la IFA (organisme allemand responsable de la sécurité et de la santé au travail) (allemand, anglais), accès le 26 juillet 2011 (JavaScript nécessaire)
- [6] :IwonaOwczarek et KrystynaBlazej, « Recommended Critical Pressures. Part I. Aliphatic Hydrocarbons », J. Phys. Chem. Ref. Data, vol. 35, no 4, 18 septembre 2006
- [7] : IwonaOwczarek et KrystynaBlazej, « Recommended Critical Temperatures. Part I. Aliphatic Hydrocarbons », J. Phys. Chem. Ref. Data, vol. 32, no 4, 4 août 2003
- [8] : « Mme Otmani S, Thèse de Magistére"Valorisation des charges lourdes compounds par le craquage catalytique», Université de M'HAMED BOUGARA Boumerdes ». (2005)
- [9] :Jennifer Lorena GIL COBA ; thèse de doctorat ; “ mise au point d'un catalyseurnanostructurépour la synthèsed'oléfines à deux et trois atomes decarbone”, université de sherbrooke, (Québec) Canada ; Juin 2016
- [10] : Jürgen Arpe Klaus Weissermel Industriel organicchemistry : sous-titre de l'ouvrage. (1è éd).John Wiley et sons; 2003
- [11] : Joao Vilhena Moreira, Steam Cracking: Kinetics and Feed Characterisation , Instituto Superior Tecnico, Lisbon, Portugal ; November 2015
- [12] : Steam craking ; Applied Plastics Engineering Handbook, 2011
- [13] : Guang Song, Lixin Tang, in Computer Aided Chemical Engineering, 2018
- [14] : <https://slideplayer.fr>, Cité le 12-05-2023
- [15] : Werner Posch, in Applied Plastics Engineering Handbook, 2011
- [16] : Demande de brevet europeen ''Procédé de vapocraquage d'éthane'' date de publication: 31.07.2019
- [17] :<https://twitter.com/princertitude/status/1288784770525274114>, date de publication : 30-07-2020

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [18] :Cours universitaires, université d'Eloued "Sources d'hydrocarbures oléfiniques et aromatiques", 2021-2022
- [19] :Daniel Decroocq, Catalytic Cracking of Heavy Petroleum Fractions., 1984 , Editions Technip
- [20] : <https://twitter.com/princertitude/status/1323927466742865921>; date de publication : 04-11-2020
- [21] : Michel Guisnet, " Le craquage catalytique , unité clé d'une raffinerie. L'actualité chimique, Février 2000
- [22] : Miao Yang, Dong Fan, Yingxu Wei, PengTian,* and Zhongmin Liu* "Recent Progress in Methanol-to-Olefins (MTO) Catalysts", (2019)
- [23] : PengTian, Yingxu Wei, Mao Ye and Zhongmin Liu , " Methanol to Olefins (MTO): From Fundamentals to Commercialization" (2015) American Chemical Society .
- [24] : Wang et al. Catalysis Today, Methanol to Olefins ;Based on the MTO paper ; (2006)
- [25] : LARBI YASMINA , "déshydrogénation des n paraffines pour l'obtention des oléfines". Etude technique , (1989_1990).
- [26] : hans-Jürgen Arpe Klaus Weissermel, " Industriel organicchemistry" : sous-titre de l'ouvrage. (1è éd).John Wiley et sons; (2003)
- [27] : Vollhardt, K. P.C. & Shore, N. Organic Chemistry (5th Ed.). New York: W. H. Freeman , (2007).
- [28] : Vollhardt, K. P.C. & Shore, N , Organic Chemistry: Study Guide and Solution Manuel (5th Ed.). New York: W.H Freeman (2007)
- [29] : Reza Davarnejad ; Jamal Azizi, ShaghayeghBahari " A Look at the Industrial Production of Olefins Based on Naphtha Feed: A Process Study of a Petrochemical Unit", September 2021
- [30] : Cornelia ; "Vasile Handbook of Polyolefins" , · (2000)
- [31] : Commission Européenne, "Fabrication des polymères", Août 2007
- [32] : Gottfried,W.Ehrenstein, F.Montagne, "Matériaux polymères : Structure, propriétés et application", Ed Hermes Science, (2000)
- [33] : G.B.Bachmann et Coll. Jour Org .Chem (1977).
- [34] : V. Potapovet, S. Tatarinchic. Chimie organique, édition Mir (1981)
- [35] : J.P.Mercier, E.Marechal, «Chimie des polymères 13-chimie des polymères : Synthèse réaction de dégradation»,1ère édition, Presse polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne, 1993

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [36] : G. Philippe. "Polymères et composites", IUT Annecy. Département Mesures Physiques MPh2 – spécialité MCPC (2011).
- [37] : S.F.Rubin, R.M. Kannan, J.A. Kornfield et C.Boeffel. Macromolécule (1995)
- [38] : <https://www.freepng.fr> , Cité le 19-05-2023
- [39] : R.Harry, A.Cock, F.W.Lampes, J.E.Marck, «Contemporary polymer chemistry : chap1-Synthesis and reactions of polymers-Ionic and coordination polymerization», Ed Pearson education, (2003)
- [40] : P.Frajman, J.M.Urbain, «Chimie organique et polymères», Ed Nathan, (2007)
- [41] : M.Fontanille, J.P.Vairon, «Polymérisation»,Techniques de l'ingénieur, (1994)
- [42] : C.Chassanieux, H.Lefebvre, S.Pascual, «Indispensable en polymère», Ed Bréal, (2008)
- [43] : IP. Mercier et E. Marechal. Chimie des Polymères, Presses Polytechniques et Universitaires, Ramondes, Suisse (1996)
- [44] : E.M.Fettes.Chemical reactions of polymers, New-York.Interscience (1984), Hight Polymers, vol (19)
- [45] : R. Perrin. J-P. Scharff. Chimie industrielle, deuxième édition,
- [46] : Christopher D. Anderson et Eric S Daniels, *Emulsion Polymerisation and Latex Applications*, SmithersRapraPublishing, 2003
- [47] : Fabrication des polymères [archive], sur scientificsentence.net , Cité le 10-06-2023
- [48] : <http://www.petrocuvo.com/en/technology/polypropylene> Cité le 10-06-2023
- [49] : <https://www.ilocis.org/fr/documents/ilo077.html>, Cité le 10-06-2023
- [50] : <https://www.jeanbal.fr> , Cité le 15-06-2023
- [51] : <https://lelementarium.fr/product/polyethylene/>Cité le 12-06-2023
- [52] : <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr>, Cité le 13-06-2023
- [53] : <https://fr.statista.com/statistiques>, Cité le 12-06-2023
- [54] : Colin Baird, Michael Cann, Robert Perraud , "Chimie de l'environnement" , (2016)
- [55] : Fondation Ellen MacArthur Pour une nouvelle économie des plastiques, (2017)
- [56] : Marc Carrega , Aide mémoireMatières plastiques, Dunod, (Paris 2005 , 2009)