

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES

Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Département Génie des Procédés Chimiques et Pharmaceutiques



## Mémoire de Master

Présenté par :

**BOUBEKEUR Manel**

et

**OURAMDANE Hayat**

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Technologie de la pétrochimie

---

### Amélioration du taux de récupération de l'isobutane de recyclage dans l'accumulateur de l'isobutane

(Unité PEHD CP2K-Skikda)

---

Devant le jury :

HAMADA Boudjema

Encadrant

UMBB

KADDOUR Omar

Président

UMBB

DEKKOUCHE Seghir

Examineur

UMBB

Année universitaire : 2023/2024

# *Remerciement :*

*Nous remercions tout d'abord Dieu le tout puissant de nous avoir donné la force, la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce travail.*

*Nous tenons à remercier ensuite nos familles qui nous ont toujours supporté et encouragé pour poursuivre nos études dans les meilleures conditions. Que Dieu vous protège et vous prête bonne santé et longue vie.*

*Nous adressons aussi toute notre reconnaissance à notre encadrant **Mr B.HAMADA** pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.*

*Nous tenons à remercier tous les professeurs de l'université qui nous ont accompagnés tout au long de notre formation et qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite dans nos études universitaires.*

*Un spécial merci au personnel du Complexe Pétrochimique 2 de Skikda : **Mr ZAROURI Oussama, Mr REZIOUEG Fares et Mr Sassane Mohamed** et à tout le personnel des différents départements de nous avoir accueilli et accompagné tout au long de notre stage. Leur soutien, leur expertise et leur encadrement attentif ont été inestimables pour nous.*

# *Dédicace :*

*Je dédie humblement ce travail :*

*À mes chers parents **Belkacem** et **Hadjila**, qui ont été mes piliers, mon inspiration et ma motivation tout au long de ce parcours et à qui je ne saurai jamais exprimer toute ma reconnaissance. À mon père, pour son soutien inconditionnel, et à ma mère, pour sa patience infinie et ses précieux conseils. Que Dieu les protège et les bénisse.*

*À mes sœurs **Zohra**, **Dounia** et **Dina** et ma belle-sœur **Selma**, à mes frères **Mohamed** et **Amir** qui ont été mes complices, mes confidents et mes meilleurs supporteurs. Votre présence a été un réconfort constant.*

*À mon adorable petite nièce **Miral** qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.*

*À mon Binôme **Manel**, avec qui j'ai partagé ce voyage académique. Merci pour ta collaboration fructueuse et ton soutien mutuel.*

*À mes amis et à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

***Hayat***

# *Dédicace :*

*Je dédie humblement ce travail :*

*À mes chers parents **Mohamed** et **Khadidja**, qui ont été mes piliers, mon inspiration et ma motivation tout au long de ce parcours et à qui je ne saurai jamais exprimer toute ma reconnaissance. À mon père, pour son soutien inconditionnel, et à ma mère, pour sa patience infinie et ses précieux conseils. Que Dieu les protège et les bénisse.*

*À ma sœur **Samah** et mes frères **Salah Eddine** et **Ayoub**, qui ont été mes complices, mes confidents et mes meilleurs supporteurs. Votre présence a été un réconfort constant.*

*À mon Binôme **Hayat**, avec qui j'ai partagé ce voyage académique. Merci pour ta collaboration fructueuse et ton soutien mutuel.*

*À mes amis et à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

***Manel***

**Résumé :**

Dans ce travail nous explorerons en profondeur le procédé Phillips utilisé pour la fabrication du PEHD en se concentrant spécifiquement sur la récupération de l'isobutane dans le système dans le but d'améliorer son taux de récupération, pour cela on va effectuer un bilan de matière dans les différentes sections de l'installation afin de déterminer les différents débits entrants et sortants du condenseur de tête de l'accumulateur de l'isobutane. Nous terminons enfin par proposer une solution pertinente au problème du cas actuel fournie sur la base de simulation HYSYS afin d'améliorer le taux de récupération de l'isobutane.

**Mots clés :**

Isobutane de recyclage, condenseur de tête de l'accumulateur de l'isobutane, taux de récupération de l'isobutane, off gas, la colonne de purification.

**ABSTRACT :**

In this work, we will explore in depth the Philips process used for the production of HDPE, focusing on the recovery of recycled isobutene within the system with the aim of improving its recovery rate. To achieve this, we will establish a material balance in the various sections of the installation to determine the different inlet and outlet flow rates of the isobutane accumulator's top condenser. Finally, we will propose a relevant solution to the current case's problem, based on HYSYS simulation, in order to improve the isobutene recovery rate.

**Keywords :**

Recycling isobutane, the isobutane accumulator's top condenser, isobutane recovery rate, off gas, purification column 950-173

**ملخص :**

في هذا العمل سنستكشف بعمق عملية فيليبس في إنتاج البولي إيثيلين عالي الكثافة مع التركيز بشكل خاص على استرجاع اليزوبوتان داخل النظام بهدف تحسين معدل استرجاعه لتحقيق ذلك سنقوم بإجراء توازن مادي في الأقسام المختلفة للمنشأة لتحديد معدلات التدفق الداخلة و الخارجة من مكثف الرأس لمجمع اليزوبوتان و أخيرا سنقترح حل مناسباً للمشكلة الحالية استناداً إلى محاكاة هايبيس لتحسين معدل استرجاع اليزوبوتان.

**الكلمات المفتاحية:** إيزوبوتان قابل للتدوير، مكثف رأس جامع اليزوبوتان، معدل استرجاع اليزوبوتان.

# **Table de matière**

---

---

## *Table de matière*

---

---

<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>10</b>
<b>Liste des figures: .....</b>	<b>12</b>
<b>Liste des abréviations .....</b>	<b>14</b>
<b>Introduction générale: .....</b>	<b>21</b>
<b>    Chapitre I : Généralités sur les polymères .....</b>	<b>22</b>
<b>    Introduction .....</b>	<b>23</b>
I.1.        Généralités .....	23
I.1.1.      Les polymères .....	23
I.1.2.      Le degré de polymérisation.....	23
I.1.3.      La polymérisation.....	24
I.1.4.      Obtention des polymères .....	24
I.1.5.      Classement des polymères.....	25
<b>    Conclusion.....</b>	<b>28</b>
<b>    Chapitre II : Généralités sur le polyéthylène .....</b>	<b>29</b>
<b>    Introduction .....</b>	<b>30</b>
II.1.       Définition de polyéthylène.....	30
II.2.       Structure chimique .....	30
II.3.       Les caractéristiques du PE.....	31
II.4.       Utilisation de polyéthylène .....	31
II.5.       Avantages et inconvénients du Polyéthylène.....	31
II.5.1.      Avantages .....	31
II.5.2.      Inconvénients .....	32

II.6.	Fabrication de polyéthylène .....	32
II.6.1.	Distillation .....	32
II.6.2.	Vapocraquage .....	32
II.6.3.	Polymérisation .....	32
II.6.4.	Granulation .....	32
II.7.	Les types de polyéthylène.....	32
II.8.	Polyéthylène à haute densité.....	33
II.8.1.	Aperçu historique .....	34
II.8.2.	Propriétés Du Polyéthylène À Haute Densité.....	34
II.8.3.	Procédé et catalyseurs de polymérisation .....	35
II.8.4.	Recyclage de PEHD .....	35
<b>Conclusion.....</b>		<b>36</b>
 <b>Chapitre III : Généralités sur l'isobutane.....</b>		<b>37</b>
 <b>Introduction.....</b>		<b>38</b>
III.1.	Généralités .....	38
III.2.	Les Distinctions entre Butane et Isobutane:Comprendre Leurs Différences Fondamentales.....	39
III.3.	Propriétés de l'isobutane.....	39
III.4.	L'obtention d'isobutane.....	40
III.5.	Utilisation de l'isobutane.....	40
III.6.	Risques et préventions.....	40
III.6.1.	Risques .....	40
III.6.2.	Prévention.....	41
III.7.	Isobutane : un gaz méconnu, mais indispensable.....	41
III.7.1.	Pourquoi est-il indispensable ?.....	41

III.8.	Effet environnemental de l'isobutane.....	41
<b>Conclusion.....</b>		<b>41</b>
<b>Chapitre IV : Présentation du complexe CP2K et description du procédé de fabrication de PEHD .....</b>		<b>42</b>
<b>Introduction .....</b>		<b>43</b>
IV.1.	Historique .....	43
IV.2.	Implantation de l'usine .....	43
IV.3.	Description de l'usine.....	44
IV.4.	Découpage du complexe.....	44
IV.5.	Organisation du CP2/K .....	45
IV.6.	Les grades du PEHD produits au niveau de CP2/K.....	45
IV.7.	Production du CP2/K .....	46
IV.8.	Description du procédé PHILLIPS .....	47
IV.9.	Préparation et traitement des matières premières.....	48
IV.9.1	Ethylène .....	48
IV.9.2	Héxène.....	49
IV.9.3	Isobutane.....	49
IV.9.4	Hydrogène.....	50
IV.9. .5.	Le catalyseur de la polymérisation PF et son activation .....	50
IV.10.	Description du procédé.....	51
IV.10.1.	Le réacteur et son alimentation .....	51
IV.10.2.	Chemin du gaz de recyclage .....	52
IV.10.3.	Chemin de la poudre .....	54
<b>Conclusion.....</b>		<b>55</b>

<b>Chapitre V : problématique et proposition de solution .....</b>	<b>56</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>57</b>
V.1. Calculs et résultats.....	57
V.1.1. Bilan de matière .....	57
V.1.2. Proposition et étude de solution.....	69
V.2. Etude économique.....	73
V.2.1. Cout d'investissement.....	73
V.2.2. Calcul des recettes.....	74
V.2.3. Calcul du gain annuel.....	74
V.2.4. Calcul des paramètres économiques.....	75
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>79</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>80</b>

# Liste des tableaux

---

---

## Liste des tableaux

---

---

Tableau 1: Propriétés physiques et chimiques d'isobutane [17].....	39
Tableau 2 : Différents grades du PEHD produits au niveau de CP2K et leurs utilisations [19].....	46
Tableau 3: Production du CP2K 2011-2016 [19].....	46
Tableau 4: Débit alimentation du réacteur.....	57
Tableau 5 : Résultats du bilan de matière du réacteur .....	59
Tableau 6 : Résultats du bilan de matière de la chambre de flash.....	61
Tableau 7 : Composition du gaz après élimination de la poudre et l'introduction de l'azote .....	62
Tableau 8 : Composition de reflux de la tête de la colonne de purification .....	62
Tableau 9 : Résultats des calculs de l'alimentation de la colonne de purification.....	63
Tableau 10 : Résultats du bilan de matière de la colonne de purification.....	65
Tableau 11: Bilan de matière de l'accumulateur de l'isobutane.....	67
Tableau 12 : Résultats de la simulation HYSYS de l'accumulateur de l'isobutane .....	67
Tableau 13 : Comparaison entre les résultats de la simulation et données réelles .....	68
Tableau 14 : Débits et compositions massiques du flux gazeux entrant dans la colonne à garnissage .....	68
Tableau 15 : Résultats comparatifs de la simulation: accumulateur+échangeur de chaleur+ballon séparateur et le cas réel existant au niveau de CP2K.....	72
Tableau 16 : Débits et compositions massiques du flux gazeux entrant dans la colonne à garnissage .....	72
Tableau 17 : Calcul du gain financier.....	75
Tableau 18: facteur d'actualisation.....	75
Tableau 19 : Résultats des paramètres économiques.....	76

# Liste des figures

---

---

## Liste des figures:

---

---

Figure 1 : Tacticité d'un polymère linéaire .....	26
Figure 2: Les copolymères linéaires .....	26
Figure 3: a) homopolymère ramifié .....	26
Figure 4: polymère réticulé .....	27
Figure 5: schéma représentatif du polyéthylène .....	30
Figure 6: La polymérisation de l'éthylène .....	30
Figure 7: La répartition entre les différentes formes .....	33
Figure 8: Structure et représentations de l'isobutane .....	38
Figure 9: implantation du complexe .....	44
Figure 10: Organisation du complexe CP2/K .....	45
Figure 11 : Schéma du procédé Phillips pour la production de PEHD.....	48
Figure 12: Traitement de l'Ethylène dans la série des traiteurs .....	48
Figure 13: Traitement de l'héxène.....	49
Figure 14: Schéma représentant le système de dégazage de l'isobutane frais .....	49
Figure 15: Schéma représentant le système de traitement de l'isobutane recyclé.....	50
Figure 16 : Traitement de l'hydrogène .....	50
Figure 17: Activateur du catalyseur.....	51
Figure 18: Réacteur du procédé.....	51
Figure 19 : Schéma montrant le réacteur du procédé .....	52
Figure 20 : Système de purification de gaz de recyclage.....	53
Figure 21: Système de récupération du polymère .....	54
Figure 22 : Silos de stockage de la poudre.....	54
Figure 23: Silos de stockage des granulés.....	54
Figure 24 : Silos de stockage de la poudre en vrac .....	54
Figure 25 : Principaux compartiments de l'extrudeuse .....	55
Figure 26 : Stockage du produit fini .....	55
Figure 27 : Schéma de simulation de l'accumulateur + échangeur de chaleur +ballon séparateur	70
Figure 28 : caractéristiques générales de l'échangeur de chaleur choisi .....	70
Figure 29 : caractéristique de l'échangeur de chaleur choisi coté calandre .....	71
Figure 30 : caractéristiques générales de l'échangeur de chaleur choisi coté calandre .....	71
Figure 31 : La composition du nouveau off-gas obtenu par simulation HYSYS .....	71
Figure 32 : Résultats de la fonction « Economics » .....	74

# Liste des abréviations

---

---

## Liste des abréviations :

---

---

### Nomenclature des équipements :

Le nom de l'équipement	L'équipement
<b>Les colonnes et les ballons de séparation</b>	
950-101	Réacteur d'élimination d'acétylène
950-103	Réacteur d'élimination d'oxygène
950-104	Réacteur d'élimination de monoxyde de carbone
950-105	Séparateur du refroidisseur d'éthylène au sécheur
950-106	Réacteur d'élimination de dioxyde de carbone
950-107	Réacteur sécheur de l'éthylène
950-111	Colonne de dégazage d'héxène
950-112	Réservoir d'alimentation d'héxène
950-114	Traiteur d'élimination de l'eau de l'héxène
950-121	Colonne de dégazage de l'isobutane frais
950-122	Réservoir d'alimentation de l'isobutane frais
950-124	Sécheur d'isobutane frais
950-125	Sécheur d'isobutane de recyclage
950-132	Sécheur d'hydrogène
950-155	Réacteur
950-159	Réservoir tampon de réfrigérant au réacteur
650-160	Pattes de décantation de réacteur
950-161	Chambre de flash
950-162	Colonne de purge
950-173	Colonne de purification de l'isobutane
950-174	Accumulateur de colonne de recyclage
950-176	Réservoir de stockage de l'isobutane de recyclage
950-422	Réservoir de charge de catalyseur à l'activateur
950-423	Activateur de catalyseur
950-461	Réservoir de stockage de l'héxène
950-462	Réservoir de stockage de l'isobutane

## **Les pompes et les compresseurs**

160-101	Compresseur d'éthylène
160-171	Compresseur de gaz de recyclage
670-111	Pompe d'héxène au sécheur
670-121	Pompe d'isobutane frais au sécheur
670-151	Pompe de réacteur
670-155	Pompe réfrigération du réacteur
670-172	Pompe d'isobutane de recyclage au sécheur
670-461	Pompe d'alimentation d'isobutane au dégazeur
670-463	Pompe d'alimentation d'héxène au dégazeur

## **Les échangeurs de chaleur**

360-421	Four de l'activateur
360-422	Préchauffeur air d'activation
410-101	Réchauffeur d'éthylène
410-103	Refroidisseur d'éthylène au sécheur
410-111	Condenseur colonne dégazage d'héxène
410-112	Rebouilleur colonne dégazage d'héxène
410-113	Refroidisseur d'héxène au sécheur
410-121	Condenseur colonne de dégazage de l'isobutane frais
410-122	Rebouilleur colonne de dégazage de l'isobutane frais
410-171	Refroidisseur inter-étage du compresseur de gaz de recyclage
410-172	Rebouilleur colonne de recyclage
410-173	Condenseur colonne de recyclage
410-176	Refroidisseur de l'extraction latérale de la colonne de recyclage
410-177	Refroidisseur de l'isobutane de recyclage au sécheur

## **Les filtres**

350-102	Filtre d'éthylène au réacteur
350-121	Filtre d'isobutane frais
350-122	Filtre d'isobutane au réacteur
350-131	Filtre d'hydrogène traité
350-161	Cyclone de fines de chambre de flash
340-162	Filtre à manche de chambre de flash
350-164	Filtre à manche de la colonne de purge
350-171	Filtre de garde de gaz recyclage

<b>Symbole</b>	<b>Signification</b>
CP1K	Complexe Pétrochimique 1 Skikda
CP2K	Complexe Pétrochimique 2 Skikda
PEHD	Polyéthylène Haut Densité
PEBD	Polyéthylène Base Densité
$\dot{m}_{\text{éth}}$	Débit d'éthylène
$\dot{m}_{\text{éth,nR}}$	Débit d'éthylène non réagi
$X_{\text{éth}}$	Taux de conversion de l'éthylène
$\dot{m}_{\text{iso}}$	Débit d'isobutane (milieu réactionnel)
$\dot{m}_{\text{hex,nR}}$	Débit d'hexène non réagi
$X_{\text{hex}}$	Taux de conversion d'hexène
$\dot{m}_{\text{cat}}$	Débit du catalyseur
$\dot{m}_{\text{pol}}$	Débit de polymère
$\dot{m}_{\text{éth,CF}}$	Débit de l'éthylène entrant la chambre de flash
$\dot{m}_{\text{éth.tête,CF}}$	Débit de l'éthylène sortant de la tête de la chambre de flash
$\dot{m}_{\text{éth.bas,CF}}$	Débit de l'éthylène sortant du fond de la chambre de flash
$\dot{m}_{\text{iso,CF}}$	Débit de l'isobutane entrant la chambre de flash
$\dot{m}_{\text{iso.tête,CF}}$	Débit de l'isobutane sortant de la tête de la chambre de flash
$\dot{m}_{\text{iso.fond,CF}}$	Débit de l'isobutane sortant du fond de la chambre de flash
$\dot{m}_{\text{hex,CF}}$	Débit de l'hexène entrant la chambre de flash
$\dot{m}_{\text{hex.tête,CF}}$	Débit de l'hexène sortant de la tête de la chambre de flash
$\dot{m}_{\text{hex.bas,CF}}$	Débit de l'hexène sortant du fond de la chambre de flash
$\dot{m}_{\text{pol,CF}}$	Débit du polymère entrant la chambre de flash
$\dot{m}_{\text{pol.tête,CF}}$	Débit du polymère sortant de la tête de la chambre de flash
$\dot{m}_{\text{pol.fond,CF}}$	Débit du polymère sortant du fond de la chambre de flash
$\dot{m}_{\text{gaz,CP}}$	Débit du gaz alimentant la colonne de purification
$X_{\text{IB/Off-gas}}$	La fraction molaire de l'IB dans l'Off-gas
$X_{\text{hex/IBR}}$	La fraction molaire de l'hexène dans IBR
$\dot{m}_{\text{total, entrée,CP}}$	Débit total entrant à la colonne de purification
$\dot{m}_{\text{éthy,entrée,CP}}$	Débit de l'éthylène entrant la colonne de purification

$\dot{m}_{iso, \text{entrée}, CP}$	Débit de l'isobutane entrant la colonne de purification
$\dot{m}_{N_2, \text{entrée}, CP}$	Débit de l'azote entrant à la colonne de purification
$\dot{m}_{\text{éth}, \text{tête}, CP}$	Débit de l'éthylène sortant du tête de la colonne de purification
$\dot{m}_{\text{éth}, \text{soutirage}, CP}$	Débit de l'éthylène sortant du soutirage de la colonne de purification
$\dot{m}_{\text{éth}, \text{fond}, CP}$	Débit de l'éthylène sortant du fond de la colonne de purification
$\dot{m}_{iso, \text{tête}, CP}$	Débit de l'isobutane sortant du tête de la colonne de purification
$\dot{m}_{iso, \text{soutirage}, CP}$	Débit de l'isobutane sortant du soutirage de la colonne de purification
$\dot{m}_{iso, \text{fond}, CP}$	Débit de l'isobutane sortant du fond de la colonne de purification
$\dot{m}_{\text{héx}, \text{tête}, CP}$	Débit de l'héxène sortant du tête de la colonne de purification
$\dot{m}_{\text{héx}, \text{soutirage}, CP}$	Débit de l'héxène sortant du soutirage de la colonne de purification
$\dot{m}_{\text{héx}, \text{fond}, CP}$	Débit de l'héxène sortant du fond de la colonne de purification
$\dot{m}_{N_2, \text{tête}, CP}$	Débit de l'azote sortant de tête de la colonne de purification
$\dot{m}_{N_2, \text{soutirage}, CP}$	Débit de l'azote sortant du soutirage de la colonne de purification
$\dot{m}_{N_2, \text{fond}, CP}$	Débit de l'azote sortant du fond de la colonne de purification
$T_{\text{isobutane}}$	Taux de récupération de l'isobutane
$\tau_{\text{isobutane design}}$	Taux de récupération de l'isobutane design
$\tau_{\text{isobutane cas actuel}}$	Taux de récupération de l'isobutane mauvais fonctionnement

# **Introduction générale**

## **Introduction générale:**

La pétrochimie est une branche de la chimie qui se concentre sur la façon dont le pétrole brut et le gaz naturel sont transformés en matières premières et autres produits utiles.

Aujourd'hui, ces ressources sont considérées comme partie intégrante de l'économie moderne, ce qui fait de la pétrochimie un domaine extrêmement précieux.

Cette science permet de produire des fertilisants, des pesticides et des herbicides, d'obtenir des fibres synthétiques et de fabriquer plusieurs sortes de plastiques et de nombreux autres articles d'usage quotidien qui font partie de la production pétrochimique.

Parmi les produits pétrochimiques, le polyéthylène à haute densité PEHD qui est l'un des principaux matériaux provenant de l'industrie pétrochimique.

La demande en polyéthylène ne fait que croître à travers le monde et l'Algérie n'échappe pas à cette tendance. Ainsi, pour satisfaire le marché national, l'Algérie a investi dans une unité de production de polyéthylène haute densité située au niveau du CP2K. L'objectif est de réduire les importations de polyéthylène et, au contraire, de viser l'exportation en cas de surplus de production.

A CP2/K, la production du polyéthylène à haute densité se base sur le procédé PHILLIPS PETROLEUM, ce dernier consiste en la polymérisation catalytique de l'éthylène dans un réacteur tubulaire continu, en phase liquide.

L'objectif de notre travail est de déterminer la consommation réelle en isobutane lors de la production de PEHD grade 5502, évaluer les pertes et suggérer des solutions pour l'amélioration du taux de récupération d'isobutane tout en réduisant les pertes afin d'augmenter la rentabilité de l'unité.

Ce travail comporte 5 chapitres :

- Le premier est consacré pour des généralités sur les polymères.
- Le second abordera des généralités sur le polyéthylène et le PEHD.
- Le troisième chapitre présente une brève étude sur l'isobutane, en ce qui concerne ses propriétés, ses applications et son obtention.
- Le quatrième est une présentation générale du complexe CP2K, et description du procédé de production du PEHD en décrivant ses différentes étapes, les matières premières utilisées et le traitement qu'elles subissent avant l'entrée du réacteur ainsi que les différentes sections qu'elle comporte.
- Dans le dernier chapitre, on calculera les bilans de matière de chaque unité pour estimer la charge réelle qui entre dans la section de purification, passant ensuite à une vérification des paramètres de fonctionnement de l'accumulateur et proposition et simulation d'une solution adaptée à notre problème à l'aide du logiciel HYSYS. On finira par une étude économique.

# **Chapitre I : Généralités sur les polymères**

## **Introduction :**

Les matériaux polymères occupent depuis longtemps une place importante dans l'industrie ainsi que dans divers domaines de notre vie courante, leurs production mondiale ne cesse d'augmenter atteignant jusqu'à 200 millions de tonnes par an de nos jours. Cette croissance dans la production des matières plastiques est liée aux nouvelles propriétés qu'elles acquièrent.

Les polymères représentent une classe de matériaux de plus en plus importante rivalisant les matériaux traditionnels, métaux et matériaux minéraux, grâce à plusieurs facteurs :

- Leur faible densité alliée à des propriétés thermomécaniques de plus en plus élaborées.
- Leur faible coût de production.
- Leurs propriétés très spécifiques notamment dans le cas des polymères fonctionnels.
- Leur possibilité de recyclage, au moins en ce qui concerne les matières thermoplastiques.

### **I.1. Généralités :**

#### **I.1.1. Les polymères :**

Un polymère est une macromolécule organique ou inorganique obtenus par la réaction de polymérisation des monomères composées principalement de carbone et d'hydrogène liées chacune aux autres par des liaisons primaires, le plus souvent covalentes.

Les polymères peuvent être d'origine naturelle (animale ou végétale) comme les caoutchoucs, les polysaccharides, le glycogène, l'ADN, les protéines...ou d'origine synthétique qui sont représentées par exemple par le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le PVC polyesters et les polyamides.

Les polymères les plus connus comprennent les matières plastiques, les caoutchoucs naturels (latex) et artificiels, les colles, les peintures ainsi que les résines. [1]

#### **I.1.2. Le degré de polymérisation :**

Un polymère peut être caractérisé par sa masse moléculaire ou son degré de polymérisation. Ce dernier représente le nombre total de monomères contenus dans une macromolécule.

Il est défini par le rapport de nombre de monomère initial par rapport au nombre de monomère à  $t=2$  :  $\Delta P = \frac{N_0}{N}$ . Cette mesure est importante car elle affecte les propriétés physiques et chimiques du polymère. Plus le degré de polymérisation est élevé, plus la chaîne de polymère est longue.

### **I.1.3. La polymérisation :**

La polymérisation est une série de réactions successives par étape ou en chaîne au cours desquelles de nombreuses petites molécules appelées monomères sont combinées pour former une grande molécule, appelée polymère. Du point de vue thermodynamique, c'est une réaction exothermique.

### **I.1.4. Obtention des polymères :**

Il existe deux types de polymérisation :

- La polyaddition : polymérisation par une réaction d'addition.
- La polycondensation : polymérisation par une réaction de condensation.

#### **I.1.4.1. Polymérisation par addition :**

Dans ce cas, les monomères sont combinés sans perte de molécules permettant l'obtention d'un polymère pur. La polymérisation par addition nécessite la présence de centres actifs. Ces derniers peuvent être créés soit sous l'influence d'une forme d'énergie externe (chaleur, radiations lumineuses ou ultraviolettes...), soit le plus souvent à partir d'un composé réactif ou d'un amorceur ajouté au milieu réactionnel, cela donne naissance à une substance amorçant  $R^*$  possédant un centre actif. Les centres actifs peuvent être des radicaux, des anions et des cations. Ils sont capables de réagir avec des molécules monomères insaturées, puis d'assurer la croissance rapide du polymère par addition successive de monomères dans une réaction en chaîne. La croissance de la macromolécule ne s'arrête que lorsque le centre actif a disparu. Ainsi, une réaction de polymérisation comporte trois étapes : amorçage, propagation et rupture de la chaîne. [1]

La polymérisation dans ce type peut se faire selon :

- Un mécanisme radicalaire.
- Un mécanisme ionique : cationique ou anionique.
- Un mécanisme par coordination.

#### **I.1.4.2. Polymérisation par condensation :**

Dans ce type de polymérisation, les monomères réagissent entre eux pour former le polymère et implique la perte d'une petite molécule, telle que l'eau ou un autre composé, par la combinaison des groupements fonctionnels.

La polymérisation par condensation produit des polymères importants tels que les polyesters, les polyamides (nylons), les polycarbonates, les polyuréthanes et les résines phénol formaldéhyde.

## **I.1.5. Classement des polymères :**

Une classification des matières plastiques est rendue nécessaire en raison du nombre très important de composés macromoléculaires actuellement commercialisés et du développement extrêmement rapide de leurs applications dans presque tous les secteurs d'activité.

Il est possible de classer les polymères selon différents critères

### **I.1.5.1. Selon leur origine :**

#### **I.1.5.1.1. Les polymères naturels :**

Ils sont dérivés de matières végétales ou animales et se présentent sous forme de fibres. Parmi les fibres végétales, on retrouve le bois, le papier, le coton, ainsi que le latex extrait de l'arbre Hévéa. Quant aux fibres animales, elles incluent le cuir, la soie et la laine. [2]

#### **I.1.5.1.2. Les polymères synthétiques :**

Ils sont entièrement créés par l'homme à partir de molécules monomères qui ne se trouvent pas dans la nature. Les structures produites par cette synthèse (polymérisation) sont souvent similaires à celles des polymères naturels. Par exemple : le polyéthylène (PE), le polychlorure de vinyle (PVC), le polystyrène (PS)... [2]

### **I.1.5.2. Selon leur structure :**

#### **I.1.5.2.1. Les polymères linéaires :**

Un polymère linéaire est une macromolécule constituée de nombreuses unités monomères disposées en ligne droite. Un polymère linéaire consiste en une seule chaîne continue d'unités répétées. Généralement, certaines unités de cette chaîne peuvent avoir des groupes pendants également appelés chaînes latérales.

Dans un polymère linéaire, les groupes pendants peuvent être disposés de différentes manières. Selon la tacticité d'un polymère, ces polymères linéaires peuvent être divisés en trois groupes principaux :

- ❖ **Polymères isotactiques** : ils ont leurs groupes pendants du même côté de la chaîne polymère.
- ❖ **Polymères syndiotactiques** : ils ont leurs groupes pendants en alternance.
- ❖ **Polymères atactiques** : les groupes pendants sont de manière aléatoire. [3]

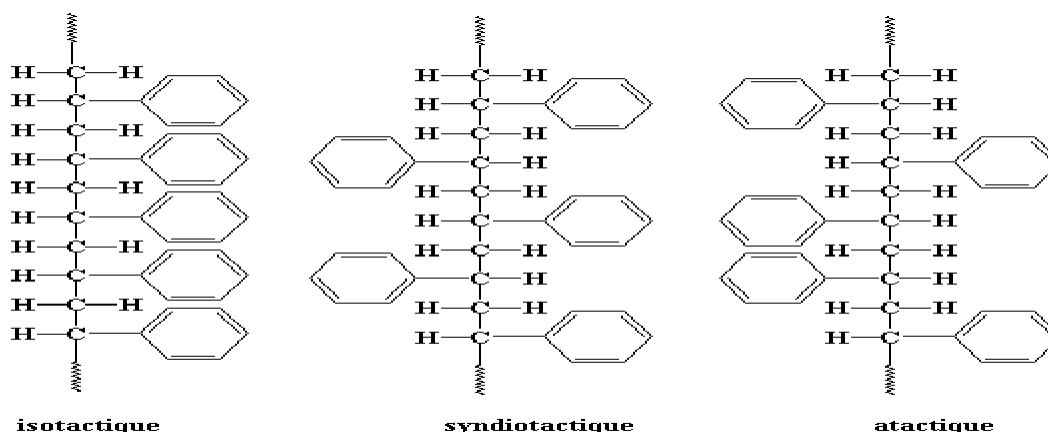


Figure 1 : Tacticité d'un polymère linéaire [3]

La chaîne peut être constituée du même monomère ou de monomères différents. S'il s'agit du même monomère, on l'appelle un homopolymère linéaire. S'il est constitué de différents monomères, on parle de copolymère linéaire. Ces copolymères peuvent se présenter sous différentes formes telles que **copolymères alternés** (où la chaîne polymère est composée de monomères alternés réguliers ayant la même concentration ainsi que l'activité chimique), **les copolymères statistiques** (où les monomères sont repartis au hasard) et **les copolymères à blocs** (où les blocs de différents monomères sont disposés dans une chaîne linéaire). [3]

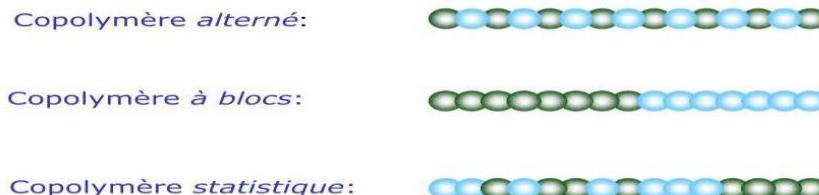


Figure 2: Les copolymères linéaires [3]

#### 1.1.5.2.2. Les polymères ramifiés :

Un polymère ramifié est caractérisé par un point de ramification dans la chaîne principale d'où en sort une chaîne latérale ou une branche, un greffon ou une chaîne pendante. Des chaînes homopolymères ou copolymères peuvent être greffées sur la chaîne principale lors de la polymérisation.

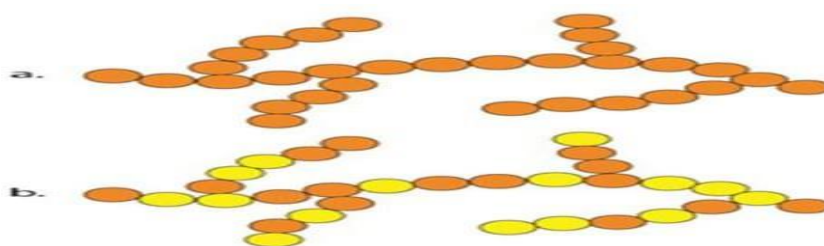
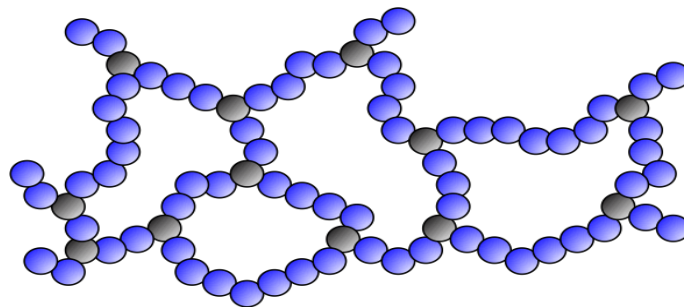


Figure 3: a) homopolymère ramifié b) copolymère ramifié [3]

### **I.1.5.2.3. Les polymères réticulés :**

Un polymère réticulé est un polymère dans lequel une structure tridimensionnelle est formée par des liaisons covalentes entre ses chaînes. Les polymères réticulés peuvent être trouvés à la fois parmi les polymères synthétiques et les polymères naturels.

La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques dans différentes directions de l'espace au cours de la polymérisation de polymères linéaires, qui conduit à la formation d'un réseau tridimensionnel. [1]



**Figure 4: polymère réticulé**

### **I.1.5.3. Selon leurs propriétés thermiques et mécaniques :**

#### **I.1.5.3.1. Polymères thermoplastiques :**

Les thermoplastiques sont, pour première approximation, constitués d'enchaînements unidimensionnels résultant de l'association de molécules simples (monomères) en chaînes macromoléculaires linéaires (éventuellement ramifiées). Ces derniers peuvent être déformés plastiquement sous l'effet de la température. Ce phénomène est réversible et théoriquement répétable, permettant leur recyclage. Les thermoplastiques peuvent présenter une variété de propriétés, tels qu'ils peuvent être durs et mou.

Parmi les thermoplastiques courants, on trouve le polyéthylène(PE), le polypropylène(PP), le polystyrène (PS), le polychlorure de vinyle (PVC)... [2]

#### **I.1.5.3.2. Polymères thermodurcissables :**

Les polymères thermodurcissables ne peuvent pas être recyclés, car leur forme, conférée dans un moule selon un processus chimique, est définitive. Ils sont plus durs et plus rigides que les polymères thermoplastiques. Les principaux polymères thermodurcissables incluent les époxydes, les phénoliques et les polyamides. [2]

#### **I.1.5.3.3. Les élastomères :**

Les élastomères constituent une famille particulière de polymères et se distinguent des plastiques (parfois appelés plastomères) par des comportements différents, notamment en termes de rigidité, de déformabilité et de résilience. Ils s'étirent sous l'effet d'une action mécanique et reviennent à leur forme initiale lorsque l'action mécanique cesse. Ex : caoutchouc, polyester. [4]

## **Conclusion :**

Les polymères jouent un rôle crucial dans notre vie quotidienne, tant dans les matériaux naturels que synthétiques. Ces matériaux ont révolutionné de nombreux secteurs, de l'emballage à l'électronique en passant par l'industrie automobile. Cependant, leur utilisation intensive soulève des préoccupations environnementales en raison de leur impact sur les déchets plastiques et la pollution. Ainsi, la recherche continue à trouver des alternatives durables, telles que les bioplastiques et les polymères biodégradables, pour répondre aux besoins de notre société tout en minimisant notre empreinte écologique. En somme, les polymères demeurent à la fois un pilier de l'innovation et un défi à relever pour une gestion plus responsable des ressources et de l'environnement.

# **Chapitre II : Généralités sur le polyéthylène**

## Introduction :

Les matières polymères jouent un rôle si crucial qu'il est difficile de concevoir notre environnement sans elles. Ces matériaux sont devenus des piliers du développement en termes de production et de consommation. La recherche constante de nouveaux procédés conduit à la création de nouveaux types et grades de matières.

Parmi ces polymères, le polyéthylène demeure un acteur majeur dans la production globale malgré l'émergence continue de nouveaux plastiques. Il reste une matière première vitale pour l'industrie de production de polymères et de plastiques, ayant réussi à remplacer de nombreux matériaux dans divers domaines au cours du siècle dernier, une tendance qui perdure encore aujourd'hui. Le polyéthylène est de plus en plus demandé à l'échelle mondiale.

### II.1. Définition de polyéthylène :

Les polyéthylènes sont des polymères appartenant à des polyoléfines issus de la polymérisation de l'éthylène gazeux, composé principalement d'unités répétitives d'éthylène. Il figure parmi les polymères les plus courants polyvalents au monde. Sa formule chimique est  $-(CH_2-CH_2)_n$ , où "n" représente le nombre de répétitions de l'unité d'éthylène. [5]

### II.2. Structure chimique :

Le polyéthylène est un polymère composé d'unités répétitives d'éthylène. D'un point de vue chimique, l'éthylène est un hydrocarbure simple composé de deux atomes de carbone et de quatre atomes d'hydrogène de formule chimique  $CH_2=CH_2$ . Lorsqu'il polymérise, les doubles liaisons entre les atomes de carbone se rompent, permettant aux monomères d'éthylène de se joindre en de longues chaînes droites ou ramifiées, formant du polyéthylène.

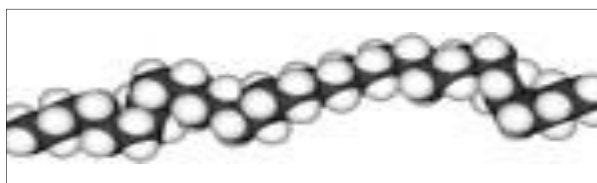
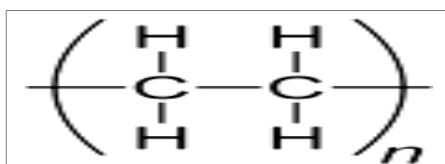


Figure 5: schéma représentatif du polyéthylène [6]

La polymérisation de l'éthylène est représentée dans la figure suivante :



Figure 6: La polymérisation de l'éthylène [6]

### II.3. Les caractéristiques du PE :

- **Composition simple** : Composé uniquement de carbone et d'hydrogène.
- **Légèreté** : Plus léger que l'eau, avec une masse volumique comprise entre 0,90 et 0,96 g/cm<sup>3</sup>.
- **Combustion complète** : Brûle entièrement en libérant du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et de l'eau.
- **Inertie et toxicité** : Inerte et non toxique. [7]

### II.4. Utilisation de polyéthylène :

Le polyéthylène est largement utilisé dans divers domaines :

- Dans l'industrie agroalimentaire pour les cuves de stockage, les réservoirs, les emballages alimentaires, les films alimentaires, les barquettes, etc.
- En industrie chimique pour des applications nécessitant une grande inertie chimique et une résistance aux agents chimiques, tels que les tuyaux, les contenants chimiques, etc.
- Pour la fabrication d'objets résistants aux chocs, tels que les coques de bateau, les gilets pare-balles, les plaques d'impact, etc.
- Dans le secteur médical pour la fabrication de prothèses médicales et d'autres dispositifs médicaux.
- Dans l'industrie du transport pour transporter de matières dangereuses avec des emballages.
- Pour la fabrication de canalisations, de tuyaux durables et résistants à la corrosion, assurant la pérennité des infrastructures dans le domaine de la construction et des infrastructures.

Cette diversité d'applications démontre la polyvalence et l'importance du polyéthylène dans de nombreux secteurs industriels. [8]

### II.5. Avantages et inconvénients du Polyéthylène :

Le polyéthylène présente des avantages significatifs mais aussi des inconvénients à prendre en considération :

#### II.5.1. Avantages :

- **Coût Abordable** : La production du polyéthylène est économique, ce qui fait un choix attractif pour de nombreuses applications.
- **Non toxique** : ce qui le rend sûr pour une utilisation dans de nombreuses applications.
- **Résistant aux chocs** : Il possède une excellente résistance aux chocs, ce qui en fait un matériau idéal pour les applications nécessitant une durabilité accrue
- **Polyvalent** : Il est adapté à une large gamme d'industries et d'applications.
- **Légèreté** : Il est léger ce qui le rend facile à manipuler et à transporter. [9]

### **II.5.2. Inconvénients :**

- Les polyéthylènes présentent une faible résistance aux agents oxydants
- Ils sont sensibles aux risques de fissuration sous très forte contrainte.
- Le polyéthylène est hautement inflammable et ne doit pas être exposé à des températures élevées. [9]

## **II.6. Fabrication de polyéthylène :**

Le polyéthylène, un polymère thermoplastique semi-cristallin, est fabriqué à partir du pétrole selon un processus en plusieurs étapes :

**II.6.1. Distillation :** Le pétrole brut est chauffé à 400°C et dirigé dans une colonne de fractionnement où les produits se condensent à différents niveaux en fonction de leur densité. La coupe NAPHTA, une fraction liquide incolore essentielle, est obtenue à 160°C entre le kérosène et l'essence.

**II.6.2. Vapocraquage :** Cette étape consiste en un fractionnement supplémentaire à haute température (825°C) en présence d'eau. Elle produit divers composants de base telle que l'éthylène, le propylène, le butadiène et des essences aromatiques.

**II.6.3. Polymérisation :** Dans un réacteur, à des températures de 30 à 100°C et des pressions de 60 à 100 bars, l'éthylène gazeux est combiné avec des catalyseurs métalliques (comme le titane et l'aluminium) et un liquide support tel que l'heptane. Le produit du polyéthylène est obtenu sous forme de poudre blanche après évaporation de l'heptane dans un séchoir, ressemblant à de la lessive.

**II.6.4. Granulation :** La poudre de polyéthylène ainsi obtenue est mélangée à des additifs pour améliorer ses performances, tels que des stabilisants, des plastifiants et des colorants comme le noir de carbone. Ce mélange est chauffé dans une granularité pour former des granules, qui servent de matière première pour divers produits en polyéthylène, tels que des canalisations et des jouets. [10]

## **II.7. Les types de polyéthylène :**

Il existe plusieurs types de polyéthylène de propriétés physiques et de structures différentes. Ils sont classés selon leur densité et sont obtenus par divers procédés :

- **Le Polyéthylène à basse densité (PEBD) :** Sa densité varie de **0,920 à 0,935 g / cm<sup>3</sup>** et comporte des ramifications importantes (environ **20 à 40 ramifications / 1000 carbone**). Ce type de PE est obtenu par le procédé à haute pression, un procédé en masse qui nécessite de comprimer l'éthylène gazeux à plus de **1000 bars** et une température entre **150 et 300°C**, en présence d'**oxygène** ou peroxyde organique. [11]

- **Le polyéthylène à haute densité (PEHD) :** Sa densité varie de **0,958 à 0,965 g / cm<sup>3</sup>**. Il est obtenu en présence d'un catalyseur à des pressions faibles (inférieur à **50 bars**) ce qui permet d'obtenir un PE plus cristallin que le PEBD (**1 à 5 ramifications / 1000 carbones**). [11]
- **Le polyéthylène à moyenne densité (PEMD) :** mais c'est en réalité un intermédiaire entre les 2 formes et n'a pas de caractéristique particulière qui mérite d'être développée. [5]

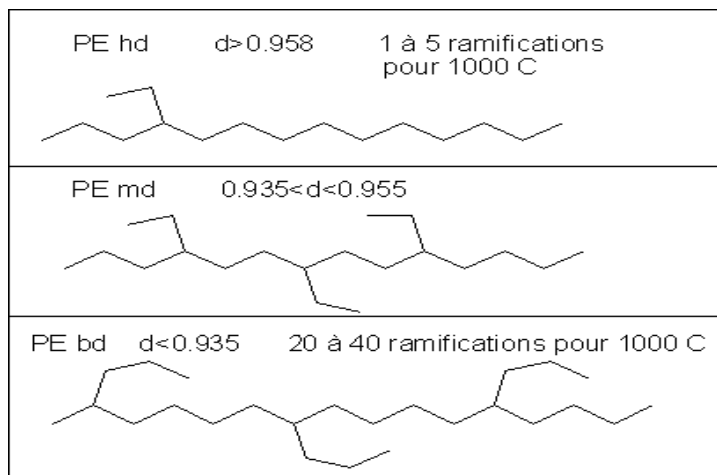


Figure 7: La répartition entre les différentes formes [11]

## II.8. Polyéthylène à haute densité :

Le polyéthylène de haute densité est un polymère thermoplastique largement utilisé, appartenant à la famille des polyoléfines, tout comme les polyéthylènes à basse ou moyenne densité. Il présente plusieurs propriétés intéressantes, notamment une bonne résilience même à basse température, une excellente résistance aux produits chimiques, faible sensibilité à l'eau, une imperméabilité à la vapeur d'eau et d'excellentes propriétés électriques. Ces caractéristiques en font un matériau idéal pour diverses applications, comme l'extrusion-soufflage de corps creux, l'injection de divers articles, l'extrusion de films, de tubes et de câbles.

Le PEHD est couramment utilisé dans les conduites de gaz en raison de sa résistance élevée au fluage. Il est obtenu par polymérisation à basse pression. Sa cristallinité peut atteindre 90 %, avec une plage de densité allant de 0,958 à 0,965 g/cm<sup>3</sup>. [12]

### **II.8.1. Aperçu historique :**

Sur le plan historique, le développement du PEHD remonte aux années 1955, lorsque la société Hoechst a lancé la première unité basée sur la catalyse Ziegler Natta suivie, en 1956, par la société Phillips Petroleum et son réacteur industriel employant un catalyseur au chrome.

Dans les années 1960, des améliorations ont été réalisées dans le procédé Ziegler grâce à l'utilisation de catalyseurs hautement efficaces, éliminant ainsi l'étape coûteuse d'élimination des résidus catalytiques. Par la suite, de nouvelles techniques ont vu le jour, telles que la polymérisation en phase gazeuse ou les procédés de type particle-form.

Pendant les années 1990, l'introduction de réacteurs de polymérisation en série a permis la fabrication de polyéthylène haute densité (PE-HD) bimodal, combinant d'excellentes propriétés mécaniques avec une facilité accrue de transformation de la résine.

Depuis le début des années 2000, une grande proportion de polyéthylène haute densité est produite à l'aide de catalyseurs métallocènes. [13]

### **II.8.2. Propriétés Du Polyéthylène À Haute Densité :**

#### **II.8.2.1. Propriétés physiques :**

La polymérisation affecte le taux de cristallisation. Une augmentation des ramifications conduit à une augmentation de la cristallinité, ce qui peut influencer l'arrangement macromoléculaire.

Les polyéthylènes blancs et cireux offrent une opacité à grande épaisseur et une transparence en film.

La perméabilité des hydrocarbures diminue avec l'augmentation de la cristallisation en raison de la diminution du volume libre entre les macromolécules, ce qui restreint la pénétration du diffusant. [14]

#### **II.8.2.2. Propriétés chimiques :**

- Bonne stabilité chimique jusqu'à environ 60°C.
- Insolubilité dans de nombreux solvants.
- Résistance aux acides, bases et solutions salines, ce qui les rend adapté pour la fabrication des verreries de laboratoire.
- Insolubilité aux attaques chimiques les rend adaptés aux applications alimentaires telles que l'emballage ou les bouteilles de lait.
- Sensibilité aux fissurations sous contraintes dans des milieux tels que le savon, l'alcool et les détergents, les rendant légèrement perméables aux solvants à l'état naturel.
- Capacité à supporter la chaleur jusqu'à 110 à 120°C tout en étant combustible. [14]

### **II.8.3. Procédé et catalyseurs de polymérisation :**

Pendant la Seconde Guerre mondiale, une grande quantité du polyéthylène a été utilisée pour isoler les câbles dans les installations radar. Dans les années 1950, de nouvelles techniques ont été développées pour produire du polyéthylène en utilisant différents catalyseurs et conditions opérationnelles, notamment des procédés à basse pression. Les systèmes développés comprenaient :

- **Le procédé Standard Oil (procédé Zletz) :** En présence d'un catalyseur à l'oxyde de molybdène, mais il est désormais abandonné.
- **Le procédé Philips :** Utilisant un catalyseur d'oxyde de chrome (CrO<sub>3</sub>) sur un support de silice et/ou alumine.
- **Le procédé Ziegler :** Ce procédé est effectué en présence d'un catalyseur à base de tétrachlorure de titane associé à tri éthyle d'aluminium.

Le polyéthylène produit par ces procédés est identifié comme du polyéthylène linéaire ou du polyéthylène haute densité (PEHD). [7] [13]

### **II.8.4. Recyclage de PEHD :**

Le recyclage du polyéthylène haute densité (PEHD) représente une solution durable pour réutiliser les déchets plastiques, ce qui contribue à réduire l'impact environnemental de l'industrie plastique. En utilisant le PEHD recyclé, il est possible de valoriser ses propriétés uniques dans la fabrication de divers produits, tels que des tuyaux et des tubes.

Il est en général passe par plusieurs étapes qui permettent de transformer les déchets plastiques en matériau réutilisable qui sont :

• **Collecte et tri des déchets plastiques :** Qui consiste à collecter les déchets plastiques, y compris ceux en polyéthylène, auprès des ménages, des entreprises et des industries. Ensuite, ils sont triés en fonction de leur type de plastique, en particulier le PEHD, afin de faciliter leur traitement ultérieur.

• **Préparation des déchets plastiques :** Une fois triés, il est nécessaire de préparer les déchets plastiques en PEHD avant de les recycler. Cette étape comprend généralement le nettoyage des déchets pour éliminer les impuretés telles que la saleté, les résidus de produits ou les étiquettes. Une fois les déchets préparés, ils sont prêts à être transformés en granulés ou en poudre de PEHD.

• **Micronisation et régénération :** La micronisation se réfère à la transformation des déchets plastiques en petites particules appelées granulés. Ces derniers sont ensuite soumis à un processus de régénération. Au cours de cette étape, les granulés sont fondus et purifiés afin d'éliminer les impuretés et les contaminants. Le matériau régénéré obtenu est alors prêt à être employé dans la production de nouveaux produits en PEHD.

• **Extrusion et fabrication de tuyaux et tubes en polyéthylène :** Les granulés de PEHD régénéré sont chauffés et fondus, puis poussés à travers une filière pour créer des tuyaux ou des tubes en polyéthylène. Grâce à ce processus on peut obtenir des produits de différentes tailles, formes et épaisseurs, adaptés à une variété d'applications industrielles. [15]

**Conclusion :**

Le polyéthylène, en tant que polymère largement utilisé, a révolutionné de nombreux aspects de notre vie quotidienne. Sa polyvalence, sa légèreté, sa résistance à la corrosion et sa facilité de fabrication en ont fait un matériau de choix dans de nombreuses industries, allant de l'emballage et du conditionnement à la construction et à l'ingénierie. Cependant, malgré ses avantages, le polyéthylène pose également des défis environnementaux en raison de sa lente dégradation et de sa contribution à la pollution plastique. Ainsi, il est impératif de poursuivre les recherches et les développements visant à rendre sa production et son utilisation plus durables, notamment en encourageant le recyclage et en explorant des alternatives biocompatibles. En fin de compte, une approche équilibrée qui prend en compte à la fois les avantages et les inconvénients du polyéthylène est nécessaire pour maximiser ses avantages tout en minimisant son impact sur l'environnement.

# **Chapitre III : Généralités sur l'isobutane**

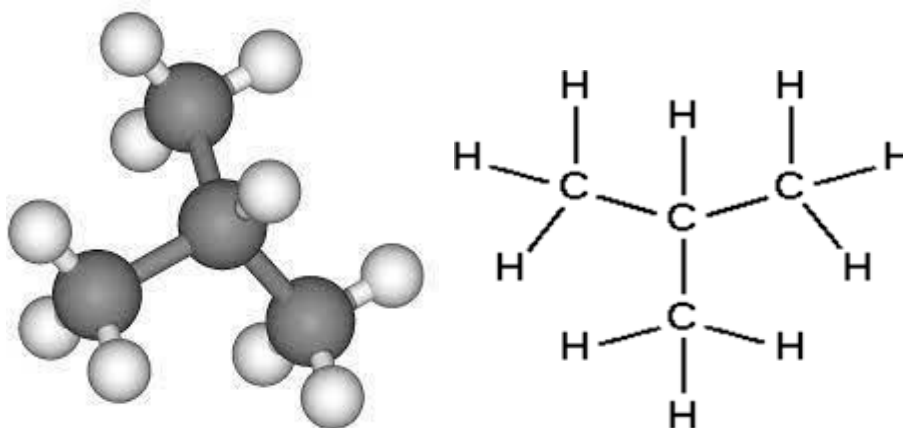
### **Introduction:**

L'isobutane, un isomère du butane, partage les mêmes atomes mais présente une configuration moléculaire différente, lui conférant ainsi des propriétés distinctes malgré sa similarité avec le butane, notamment son absence d'odeur et de couleur. De plus, sa densité et son point d'ébullition diffèrent également de ceux du butane. Couramment utilisé comme gaz réfrigérant, l'isobutane liquide s'avère efficace dans les réfrigérateurs et les congélateurs, sans impacter négativement l'environnement, contrairement aux gaz fluorés qui avaient cet effet jusqu'aux années 1990. Son utilisation a gagné en popularité avec le projet Greenfreeze de Greenpeace et Foron en 1993. Les mélanges d'isobutane (R-600a) ont un faible impact sur la couche d'ozone et sur le réchauffement planétaire, ce qui en fait des alternatives fonctionnelles aux gaz réfrigérants plus anciens. Ils remplacent progressivement le Fréon comme gaz propulsif dans divers aérosols, aujourd'hui présents dans de nombreux produits tels que les cosmétiques, les nettoyeurs, les revêtements et les produits alimentaires

### **III.1. Généralités :**

L'isobutane ou **2-méthylpropane** est un hydrocarbure de formule brute  $C_4H_{10}$  que l'on trouve sous forme de gaz dans les conditions normales de température et de pression. Il s'agit d'un isomère du butane. Utilisé comme fluide réfrigérant dans la fabrication de carburants et d'autres produits chimiques. [16]

L'isobutane est un gaz incolore, inflammable, liquéfié avec une odeur douceâtre



### **III.2. Les Distinctions entre Butane et Isobutane: Comprendre Leurs Différences Fondamentales :**

Le butane et l'isobutane sont deux composés chimiques différents. L'isobutane est un isomère du butane, ce qui signifie qu'ils sont composés des mêmes atomes, mais leur arrangement spatial est différent. Cela résulte en une différence de formule plutôt que de constitution. Bien que Les deux gaz soient inodores et incolores, ils possèdent des propriétés physiques distinctes. Leur point d'ébullition ( $-1^{\circ}\text{C}$  pour le butane et  $-11,7^{\circ}\text{C}$  pour l'isobutane) et leur densité, par exemple, ne sont pas les mêmes. [17]

### **III.3. Propriétés de l'isobutane :**

Les propriétés chimiques et physiques sont représentées sur le tableau suivant :

<b>La formule</b>	$\text{C}_4\text{H}_{10}$
<b>Classification</b>	Alcane
<b>Etat et forme</b>	Gaz liquéfié
<b>Inflammabilité</b>	Gaz inflammable
<b>Odeur</b>	Odeur d'essence ou de gaz naturel
<b>Masse molaire</b>	58,123 kg/kmol
<b>T° fusion</b>	$-159,42^{\circ}\text{C}$
<b>T° ébullition</b>	$-11,7^{\circ}\text{C}$
<b>Masse volumique</b>	$2,506\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ( $15^{\circ}\text{C}$ , 1 bar)
<b>Point d'éclair</b>	$-83^{\circ}\text{C}$

Tableau 1: Propriétés physiques et chimiques d'isobutane [17]

### **III.4. L'obtention d'isobutane :**

L'isobutane est classé parmi les gaz de pétrole liquéfiés (GPL), tout comme le butane et le gaz propane. Naturellement présent sous forme gazeuse, il est ensuite pressurisé et liquéfié pour le transport. Il peut être produit de deux façons :

• **A partir du traitement du pétrole brut :** Lors du raffinage du pétrole brut, le processus de stabilisation de la fraction légère produit du GPL, qui contient du propane, du butane et du l'isobutane. L'isobutane est ensuite séparé des autres composants du GPL par des processus de fractionnement et de purification.

• **Par transformation du butane :** L'isobutane est synthétisé à partir du butane provenant des formations du gaz naturel. Cette synthèse peut se faire par des méthodes telles que l'isomérisation catalytique. [17]

### **III.5. Utilisation de l'isobutane :**

- Utilisé comme Propergols dans les aérosols ou les produits en mousse.
- Utilisé comme combustible pour le chauffage, la cuisine et la production d'électricité.
- Ajouté à l'essence pour améliorer son indice d'octane et réduire la pollution atmosphérique.
- Utilisé dans la synthèse de solvants, de produits pharmaceutiques et de produits chimiques agricole.
- Utilisé comme moyen de stockage d'énergie, en particulier dans les énergies renouvelables.
- Utilisé comme gaz réfrigérant dans les réfrigérateurs et congélateurs en remplacement des gaz fluorés, avec un impact environnemental réduit.
- Principale matière première des unités d'alkylation des raffineries.
- Utilisé comme réactif de base pour la production du peroxyde de di-tert-butyle, un composant important des carburants.
- Composant dans les agents gonflants ou gaz de moussage, utilisés dans la fabrication des matériaux d'emballage en mousse de polyéthylène et en polyéthylène à basse densité (PEBD). [16]

### **III.6. Risques et préventions :**

#### **III.6.1. Risques :**

- L'isobutane est extrêmement inflammable, ce qui peut entraîner des risques d'incendie et d'explosion s'il est en contact avec une source d'inflammation.
- Il forme un mélange explosif avec l'air lorsqu'il est présent à une concentration comprise entre 1,8 et 8,4 %.
- L'exposition à des concentrations élevées d'isobutane peut provoquer des effets néfastes sur la santé, tels que des nausées, des étourdissements, de la fatigue, voire une dépression du système nerveux.
- Il peut irriter les voies respiratoires et provoquer la somnolence et les vertiges. [16]

### **III.6.2. Prévention :**

En raison de son caractère inflammable, une gestion particulière des risques est nécessaire, ainsi que des méthodes d'intervention appropriées :

- Pas de flamme, ni d'étincelles,
- Interdiction de fumer dans les zones d'intervention, qui doivent être ventilées et équipées de dispositifs d'extraction basse.
- Éviter le contact avec des agents oxydants.
- Utiliser des outils antidéflagrants. [16]

## **III.7. Isobutane : un gaz méconnu, mais indispensable**

### **III.7.1. Pourquoi est-il indispensable ?**

L'isobutane est devenu un élément indispensable dans notre quotidien en raison de ses caractéristiques chimiques exceptionnelles et de son faible impact environnemental. Des études ont prouvé qu'il s'agit d'un gaz écologique qui ne représente qu'un danger très limité pour la couche d'ozone.

Ce fait est d'une importance capitale à une époque où la réduction de l'utilisation des énergies fossiles polluantes est devenue essentielle pour protéger notre environnement. Ainsi, l'isobutane est en train de remplacer progressivement les gaz fluorés et propulsifs qui étaient utilisés jusqu'à aujourd'hui. [16]

## **III.8. Effet environnemental de l'isobutane :**

L'isobutane, bien qu'il soit considéré comme respectueux de l'environnement, a un impact sur celui-ci en raison de sa production et de son transport. Sa production contribue aux émissions de gaz à effet de serre, ce qui peut avoir des répercussions sur l'environnement. De plus, l'utilisation de l'isobutane en tant que combustible fossile, soulève des préoccupations environnementales. Malgré ses avantages environnementaux dans la production de plastiques et d'autres applications, il est essentiel de prendre en compte son impact global sur l'environnement en raison de sa nature de combustible fossile. [18]

## **Conclusion :**

L'isobutane, grâce à ses propriétés physiques uniques et à sa polyvalence, joue un rôle essentiel dans de nombreuses industries. Cependant, sa manipulation requiert une attention particulière en raison des risques potentiels qu'il présente. Des efforts continus sont déployés pour améliorer la sécurité et réduire l'impact environnemental de l'utilisation de l'isobutane, assurant ainsi des pratiques durables et responsables dans son utilisation.

**Chapitre IV : Présentation  
du complexe CP2K et  
description du procédé de  
fabrication de PEHD**

## **Introduction :**

L'usine POLYMED de Skikda comporte deux procédés de production dans une même installation :

- Procédé Phillips
- Procédé Ziegler

Depuis sa mise en service, elle n'utilise que le procédé Phillips, car le catalyseur du procédé Ziegler, à base de tétrachlorure de titane, est plus coûteux que celui du procédé Phillips

Le présent chapitre est consacré dans un premier lieu, à identifier de manière générale le complexe pétrochimique CP2/K Skikda. Nous examinerons en détail son histoire, son emplacement, les différentes zones qui le composent, nous exposerons aussi la gamme des grades de PEHD produits par CP2K ainsi que sa production annuelle des quatre dernières années. Nous terminerons par décrire les différentes sections du procédé de fabrication du PEHD.

### **IV.1. Historique :**

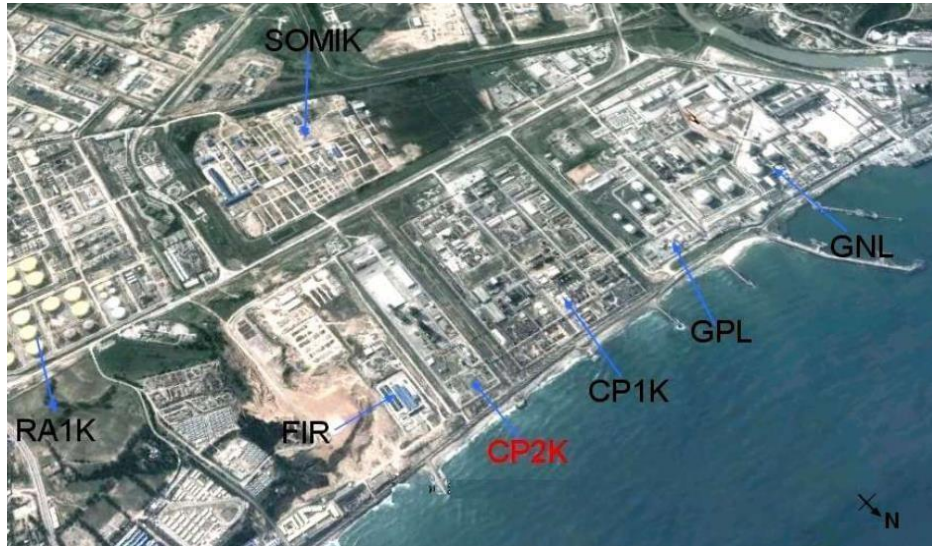
Le complexe CP2K a vu le jour au niveau de la zone industrielle de SKIKDA en janvier 2004, suite à la signature du projet de réalisation d'une unité de polyéthylène haute densité en avril 1991 entre l'ENIP (Entreprise Nationale des Industries Pétrochimiques) et RepsolQuimica (filiale de Repsol), dans le cadre de la coopération industrielle Algéro-Espagnole. L'unité mixte était alors nommée POLYMED (Méditerranéenne des Polymères). Le capital de l'unité était détenu par l'ENIP à 64%, REPSOL à 23% et BAD (Banque Algérienne de Développement) à 13%. Par la suite, l'ENIP a racheté les parts de REPSOL et la BAD après que ces derniers aient décidé de se retirer. Aujourd'hui, Sonatrach a repris l'unité qui porte désormais le nom de CP2K. [19]

### **IV.2. Implantation de l'usine :**

Le complexe CP2/K est situé à l'intérieur de la zone industrielle de Skikda, sur une superficie totale de 166800 m<sup>2</sup>, dont 10% sont construits. Le projet PEHD se trouve sur la côte, à 6 km à l'est du centre-ville de la wilaya de Skikda, à une altitude moyenne d'environ 6 mètres au-dessus du niveau de la mer.

Sa position géographique est délimitée comme suit :

- Au Nord : par la mer Méditerranée.
- Au Sud : par la route principale de la zone industrielle.
- À l'Est : par la FIR (Force d'Intervention et de Réserve).
- À l'Ouest : par le CP1/K (complexe de production de matière plastique). [19]



**Figure 9: implantation du complexe [19]**

### **IV.3. Description de l'usine :**

Le complexe CP2K a pour objectif de produire du polyéthylène à haute densité (PEHD) d'une capacité de 130.000 tonnes par an.

Les matières premières utilisées par le complexe comprennent :

- **L'éthylène** : Le principal réactif, provenant précédemment du CP1K situé à proximité, et importé ces dernières années d'Italie, de Libye, d'Espagne, d'Arabie saoudite, entre autres.
- **L'isobutane** : faisant partie du milieu réactionnel en tant que diluant, provenant de GL1/K situé à proximité.
- **L'hexène** : Permettant de régler la densité du polymère et l'indice de fluidité.
- **Catalyseur** : Le catalyseur utilisé est un catalyseur à base de chrome sur support de silice. [19]

### **IV.4. Découpage du complexe :**

Le complexe est composé de 04 zones importantes :

- **La zone off-site** : Elle regroupe les utilités telles que : les chaudières, l'air, l'azote, l'eau distillée, l'eau anti incendie, l'eau potable, ainsi que les installations auxiliaires telles que : la torche, le stockage de l'isobutane et de l'hexène, le traitement des eaux et l'activation du catalyseur.
- **La zone humide** : Elle comporte le réacteur, les différents traiteurs et les compresseurs.
- **La zone sèche** : Elle est composée de l'extrudeuse, des soufflantes, des silos de stockage des produits finis (poudre et granulé) ainsi que de la partie de l'ensachage.

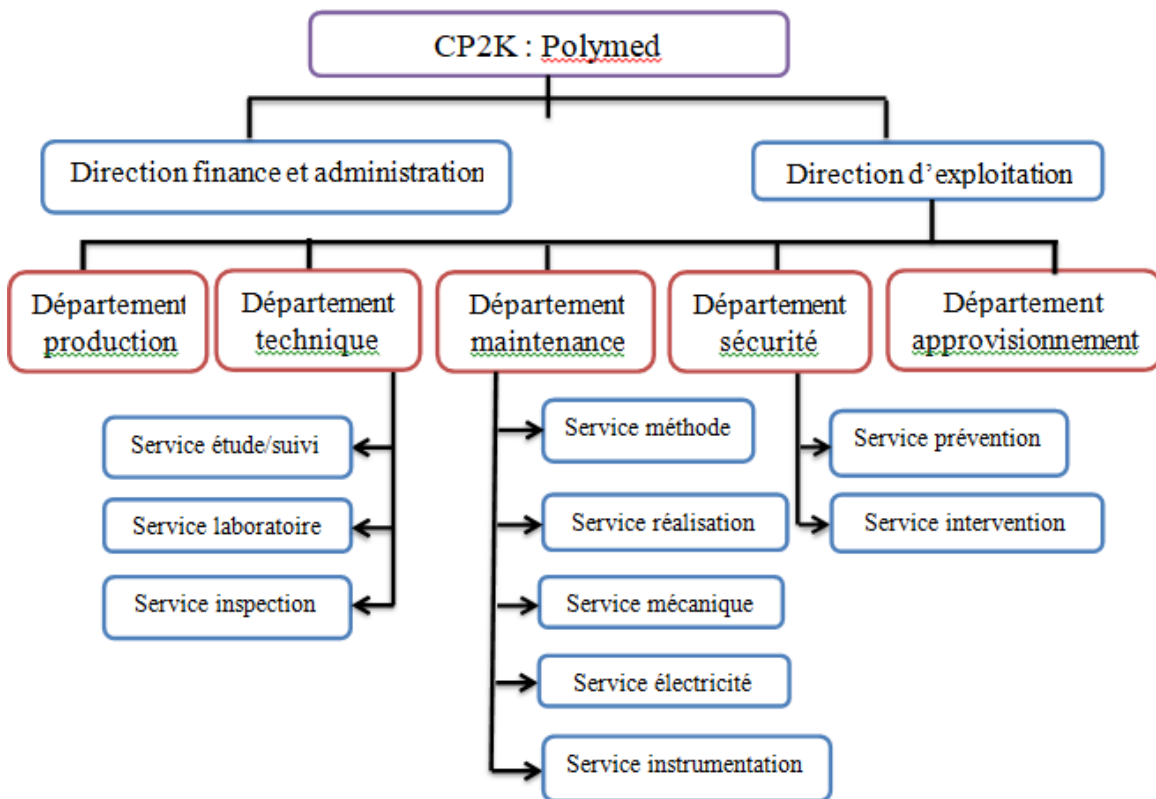
• **La zone bâtiment** : Elle comprend le bloc administratif et des finances, la cantine et les vestiaires, le bloc sécurité et infirmerie, le magasin des pièces de rechanges et l'atelier de maintenance, la sous station haute et basse tension ainsi que la salle de contrôle et le laboratoire. [19]

#### **IV.5. Organisation du CP2/K :**

Le complexe est constitué de deux directions :

- Direction finance et administration.
- Direction d'exploitation, qui se divise en 5 départements. [19]

Un organigramme résumant l'organisation du CP2/K est présenté ci-dessous :



**Figure 10: Organisation du complexe CP2/K**

#### **IV.6. Les grades du PEHD produits au niveau de CP2/K :**

Compte tenu des nombreuses applications du PEHD, telles que la fabrication de tuyaux, de films plastiques pour divers usages, de bouteilles, etc., différents grades doivent être produits.

Le complexe CP2/K propose neuf grades de PEHD, chacun étant caractérisé par son indice de fluidité et sa densité, comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

<b>Grade</b>	<b>Indice de fluidité (poudre/granulé)</b>	<b>Densité</b>	<b>Utilisation</b>
<b>TR402</b>	0,11 -0,19 / 0,08-0,14	0,9430 -0,9460	Pipe :(Tube eau).
<b>TR418</b>	-	-	Tube gaz.
<b>5502</b>	0,55 -0,70/ 0,27-0,43	0,9530 -0,9580	Soufflage : des bouteilles de petite et grande taille.
<b>TR140</b>	0,33 -0,48 / 0,20-0,36	0,9430 -0,9480	Film : usage général toute sacherie.
<b>TR144</b>	0,25 -0,38 / 0,14-0,24	0,9420 -0,9470	Film : usage général toutes sacherie.
<b>6080</b>	7,0-10,0 / 6,80-9,20	0,9590 -0,9650	Injection: Palette, caisse, bidon ,bouchon, casier, articles de ménage.
<b>6030</b>	2,0 -3,80 / 1,80 -3,20	0,9590 -0,9650	Injection: Palette, caisse, bidon ,bouchon, casier, articles de ménage.
<b>6040</b>	3,0 -5,80 / 2,80-5,20	0,9590 -0,9650	Injection: Palette, caisse, bidon ,bouchon, casier, articles de ménage..
<b>6006L</b>	0,80 -1,15 / 0,47-0,73	0,9570 min	Soufflage :Bouteilles de petite et grande taille.

**Tableau 2 : Différents grades du PEHD produits au niveau de CP2K et leurs utilisations [19]**

#### **IV.7. Production du CP2/K :**

La production de PEHD au sein de CP2K au cours des dernières années est présentée dans le tableau ci-dessous :

<b>Année</b>	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<b>Quantité Produite</b>	10577	15705	11415	1614	14005	15101

**Tableau 3: Production duCP2K 2011-2016 [19]**

#### **IV.8. Description du procédé PHILLIPS :**

Le procédé Phillips, connu sous le nom PF process ou procédé de particules, a été développé spécifiquement pour l'usine POLYMED. Ce procédé nécessite une pureté élevée des matières premières et ne supporte que de très faibles quantités de substances nocives qui pourraient perturber le fonctionnement du réacteur ou altérer la qualité du produit final.

##### **Les charges utilisées :**

- ❖ L'éthylène en phase gazeuse, qui est la charge principale.
- ❖ L'isobutane en phase liquide, c'est le milieu réactionnel.
- ❖ L'hexène en phase liquide et hydrogène en phase gazeuse, en faibles quantités.

**Le catalyseur :** l'oxyde de chrome (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) supporté sur silice.

**Les conditions opératoires de la réaction de polymérisation :** les deux conditions essentielles dans le réacteur sont :

**La température :** varie de 93 à 110°C, selon le grade à produire.

**La pression :** de 42 à 44 bars, selon la fermeture ou l'ouverture des vannes de décharge.

Il est nécessaire de soumettre les matières premières à un processus de conditionnement et de purification, afin d'obtenir le degré de pureté exigé par la réaction de polymérisation qui consiste essentiellement à produire le polyéthylène.

La figure suivante présente le schéma technologique de procédé de production de PEHD :

1. Section de traitement de l'éthylène.
2. Réacteur de traitement de l'hydrogène.
3. Section de traitement de l'hexène.
4. Section de traitement de l'isobutane frais.
5. Section de l'activation et l'injection du catalyseur.
6. Section de réaction (réacteur tubulaire).
7. Chambre de flash (séparation poudre-isobutane).
8. Colonne de purge.
9. Section de purification de l'isobutane recyclé.
10. Section de déshexanisation et récupération de l'isobutane recyclé.
11. Stockage de l'isobutane recyclé.
12. Chambre de flash alternative. [19]

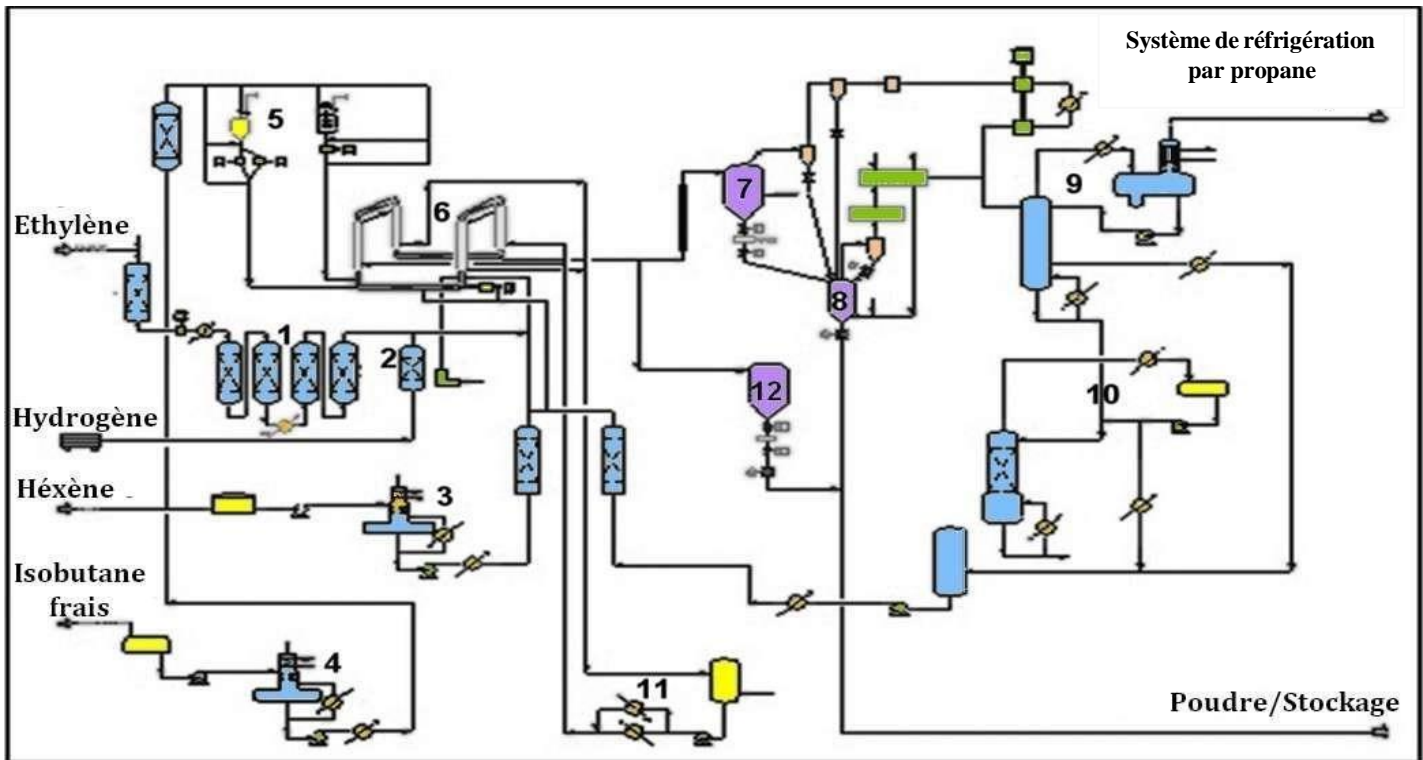


Figure 11 : Schéma du procédé Phillips pour la production de PEHD [19]

#### IV.9. Préparation et traitement des matières premières :

##### IV.9.1 Ethylène :

L'éthylène est le principal réactif du procédé, il est importé de nos jours de l'étranger. L'éthylène provenant de l'étranger contient des teneurs en CO, CO<sub>2</sub>, humidité, O<sub>2</sub>, acétylène, méthanol supérieures au seuil toléré, ce qui constitue des poisons pour le catalyseur.

Il doit donc être traité pour éliminer l'acétylène en le convertissant en éthylène par addition d'hydrogène, ce dernier est filtré avant d'être mélangé avec acétylène.

Ensuite il est traité dans des réacteurs d'élimination d'O<sub>2</sub>, du CO, du CO<sub>2</sub>, d'humidité, et méthanol pour obtenir à la fin un éthylène de haute pureté. [19]

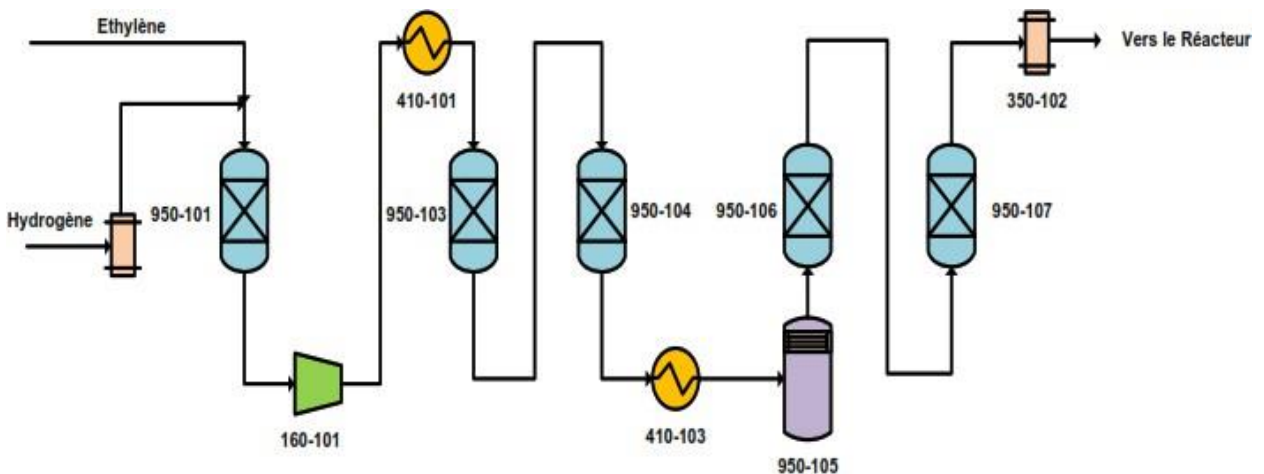


Figure 12: Traitement de l'Ethylène dans la série des traiteurs [19]

### IV.9.2 Héxène :

L'héxène est dégazé, séché puis ajouté au courant d'alimentation du réacteur pour produire des copolymères. L'héxène en petites quantités altère la structure moléculaire du polymère, change les propriétés physiques de ce dernier et contrôle la densité du produit. [19]

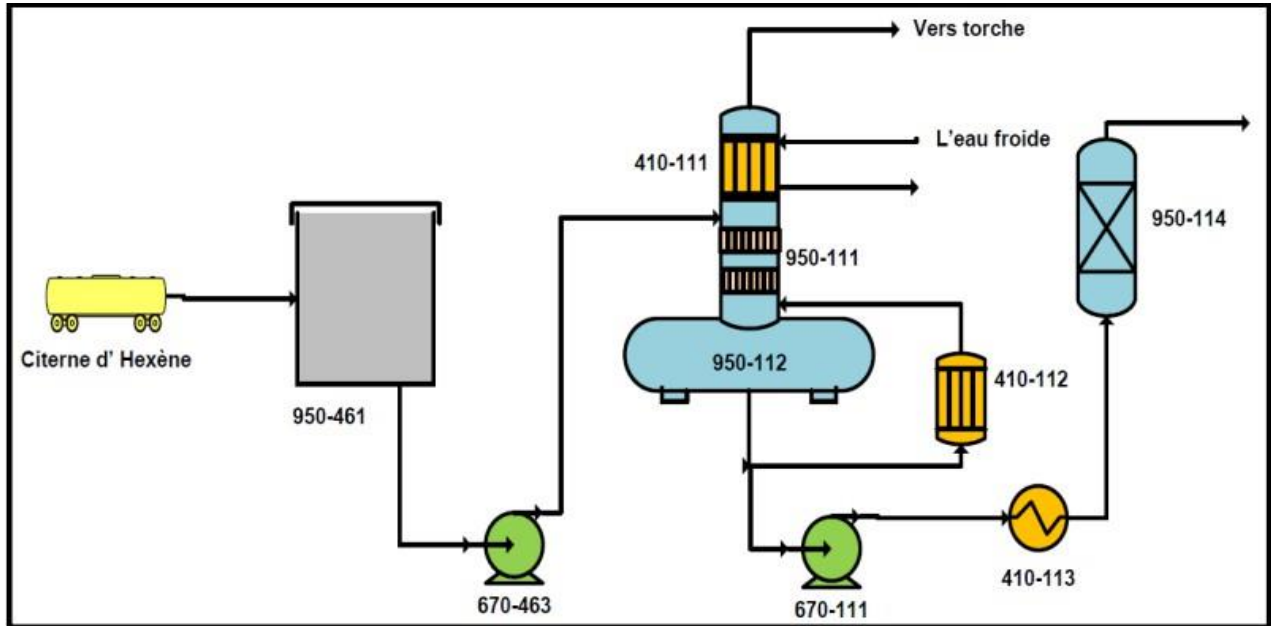


Figure 13: Traitement de l'héxène [19]

### IV.9.3 Isobutane :

Il existe deux types d'isobutane : l'isobutane frais et l'isobutane de recyclage.

L'isobutane frais, après purification et séchage est utilisé comme produit de nettoyage et lavage afin d'éviter d'éventuels bouchons de polymères pouvant obstruer les orifices et les lignes de petits diamètres. Il est aussi utilisé pour apporter l'appoint nécessaire au bon fonctionnement de la réaction. L'isobutane de recyclage, sec et purifié, est utilisé comme solvant (milieu réactionnel) dans le réacteur. [19]

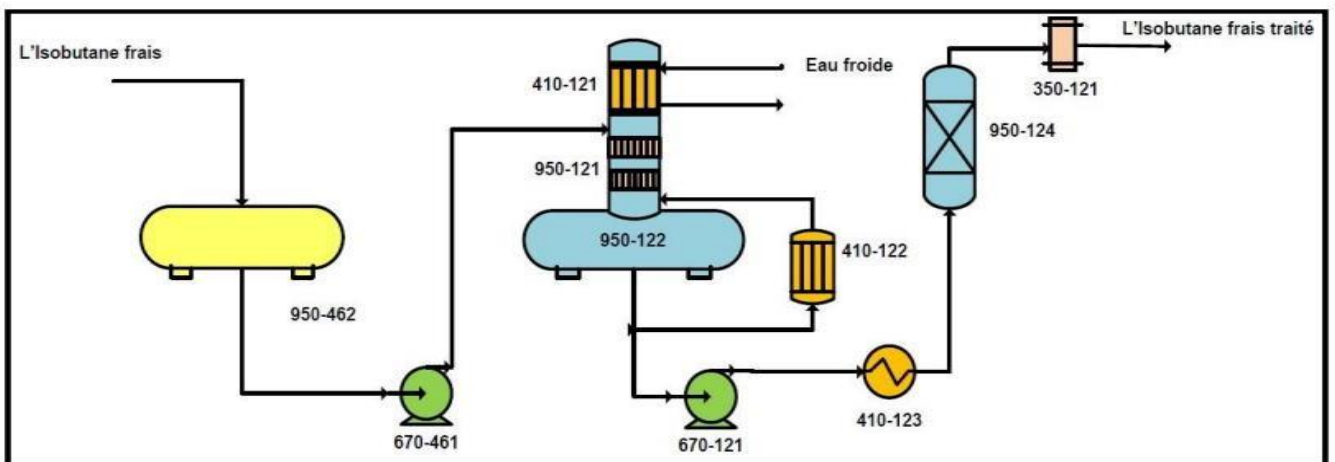


Figure 14: Schéma représentant le système de dégazage de l'isobutane frais

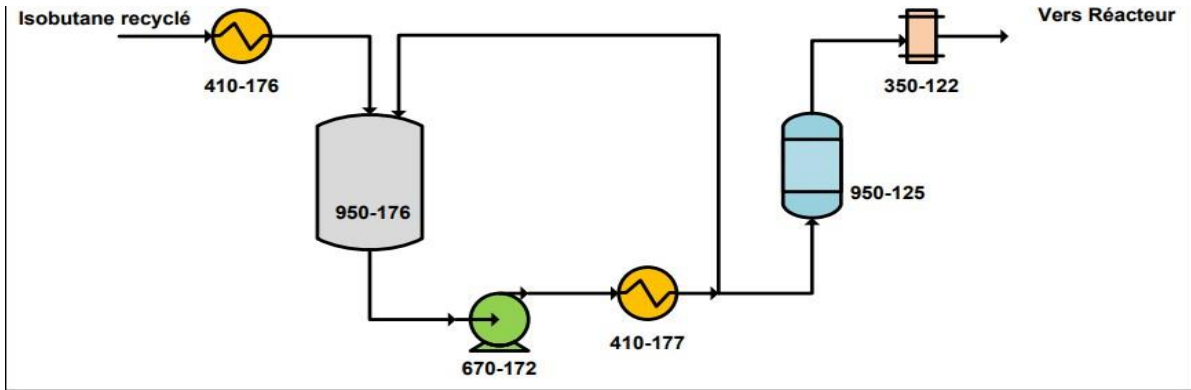


Figure 15: Schéma représentant le système de traitement de l'isobutane recyclé [19]

#### IV.9.4 Hydrogène :

L'hydrogène séché est ajouté au réacteur pour contrôler l'indice de fluidité du polymère. Celui-ci est inversement proportionnel à la longueur de la chaîne de la molécule. Une haute concentration en hydrogène augmente l'indice de fluidité du polymère. [19]

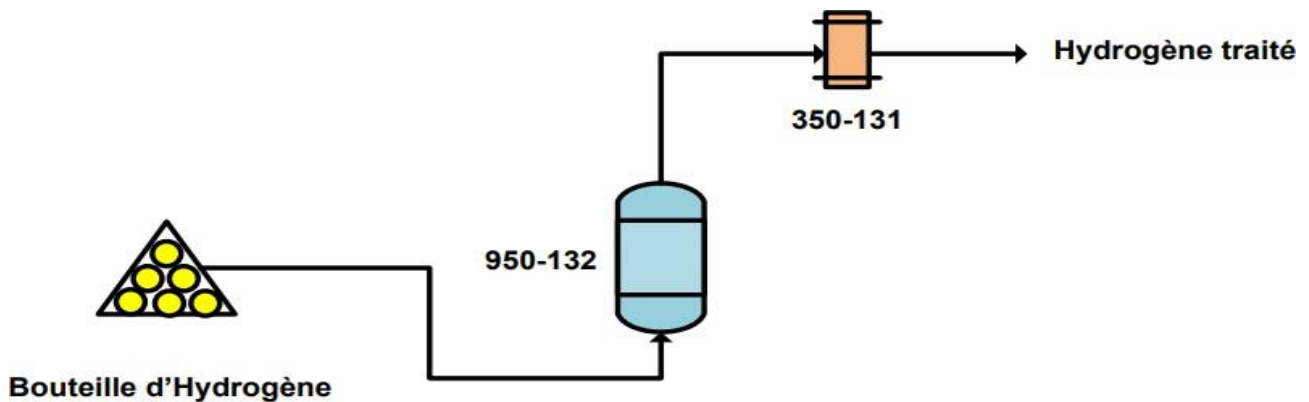


Figure 16 : Traitement de l'hydrogène

#### IV.9.5. Le catalyseur de la polymérisation PF et son activation :

Le catalyseur de la réaction de polymérisation est le chrome de type PF (PHILLIPS). Avant d'être incorporé au réacteur, il exige un processus préalable d'oxydation (activation), il doit être activé par le chauffage dans un lit fluidisé avec de l'air chaud sec provenant de l'usine, à des températures qui atteignent 982°C.

L'objectif principal de l'activation du catalyseur PF est d'éliminer l'eau et les produits volatils par contact avec l'air sec et chaud dans le lit fluidisé. En plus de l'élimination de l'eau du catalyseur, le changement de l'état d'oxydation du chrome a lieu, de  $\text{Cr}^{(\text{III})}$  à  $\text{Cr}^{(\text{VI})}$  (changement de la valence de 3 à 6).

Dans le réacteur, en contact avec l'éthylène, la valence du chrome passe de  $\text{Cr}^{(\text{VI})}$  à  $\text{Cr}^{(\text{II})}$ . Ce dernier polymérise l'éthylène en polyéthylène. [19]

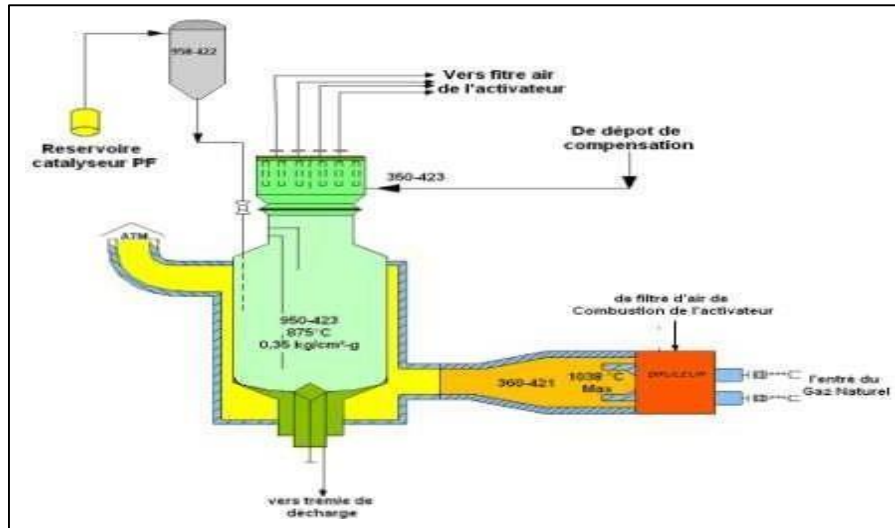


Figure 17: Activateur du catalyseur

#### IV.10. Description du procédé :

##### IV.10.1. Le réacteur et son alimentation :

Le réacteur 950-155 est une tuyauterie de diamètre interne de 560 mm en forme de boucle, composé de quatre tronçons verticaux, unis par des tronçons horizontaux. Les tronçons verticaux disposent de chemises calorifugées pour la réfrigération. Celles-ci, de 760mm de diamètre extérieur, ont des conditions de design qui sont une pression de 15 kg/cm<sup>2</sup> et une température de 142°C.

Pendant le fonctionnement, les conditions opératoires sont de 42,2 kg/cm<sup>2</sup> et de 85 à 110 °C.

Le fond du réacteur dispose de six pattes de décantation, 950-160 A/B/C/D/E/F chacune possédant deux vannes en série, une vanne de blocage en tête et une vanne de décharge au fond, qui s'ouvrent et se referment alternativement pour concentrer le polymère solide contenu dans le mélange polyéthylène-isobutane par décantation, avant que le produit soit déchargé dans la chambre de flash 950-161.

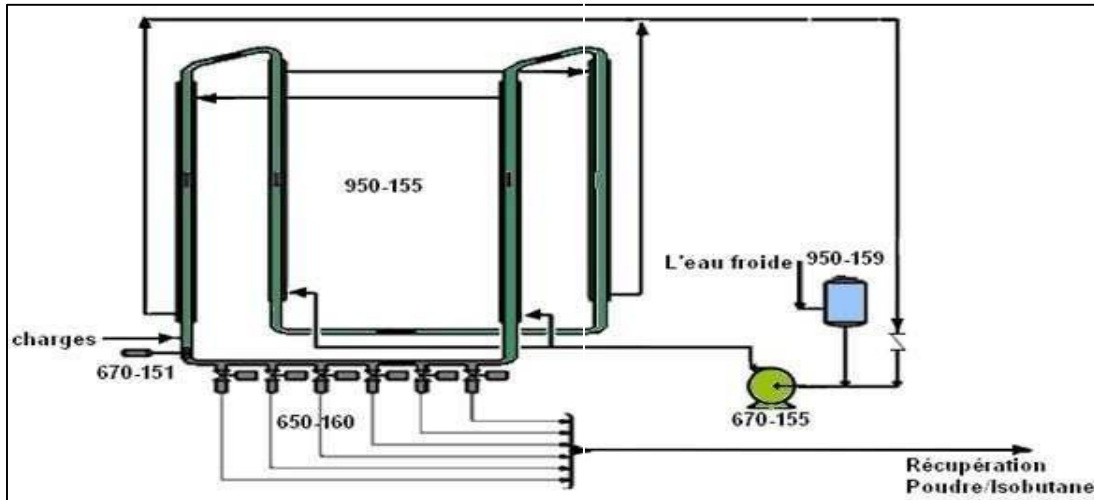


Figure 18: Réacteur du procédé

Après traitement des matières premières dans les différentes sections précédentes, elles sont envoyées vers le réacteur pour l'alimenter.

La réaction de polymérisation est exothermique, à raison de 800 kilocalories par kilogramme de polymère formé. Cette chaleur de réaction s'élimine au moyen du système de réfrigération du réacteur, celui-ci est conçu tant pour le chauffage que pour le refroidissement.

Le réfrigérant circule dans les chemises des quatre pattes verticales du réacteur. [19]



**Figure 19 : Schéma montrant le réacteur du procédé**

La poudre déchargée du réacteur est conduite par des lignes de flash chauffées avec de l'eau vers la chambre de flash, où elle se sépare de l'isobutane par détente et vaporisation de ce dernier. L'isobutane est récupéré en tête de la chambre de flash, tandis que le polymère est mené par le fond vers la colonne de purge.

Le mélange réduit sa pression de 42,2 kg/cm<sup>2</sup>g, (pression normale d'opération dans le réacteur), à 0,37kg/cm<sup>2</sup>g (la pression normale d'opération dans la chambre de flash). A l'aide de lignes de flash, le mélange est réchauffé par de l'eau chaude pour favoriser la vaporisation de l'isobutane, l'éthylène, l'héxène et l'hexane présents. [19]

#### **IV.10.2. Chemin du gaz de recyclage :**

Dans la chambre de flash, la chaleur nécessaire pour garantir la vaporisation complète des hydrocarbures, qui accompagnent le polymère, est apportée au moyen de la chaleur sensible propre au polymère ou par circulation de l'eau chaude dans les panneaux prévus à cet effet. Les vapeurs d'hydrocarbures sortent par la tête de la chambre de flash et se dirigent vers le système de purification et de récupération du gaz de recyclage. Le polymère se décharge par gravité à partir du fond de la chambre de flash vers la colonne de purge. [19]



### IV.10.3. Chemin de la poudre :

Dans la chambre de flash, la chaleur nécessaire pour garantir la vaporisation complète des hydrocarbures, qui accompagnent le polymère, est apportée. Le polymère se décharge par gravité à partir du fond de la chambre de flash vers la colonne de purge.

Une fois la poudre déchargée de la colonne de purge ou de la chambre de flash alternative, elle entre dans le système de transport pneumatique et de finition, dans l'aire sèche de l'usine. [19]

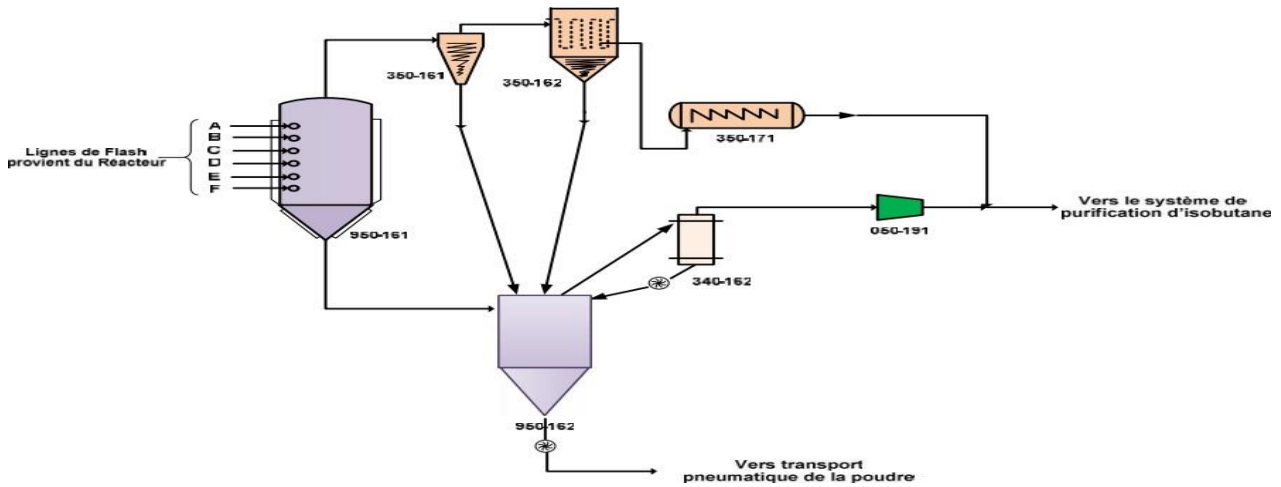


Figure 21: Système de récupération du polymère

Le polymère déchargé peut être stocké en tant que poudre dans les silos de poudre pour l'alimentation postérieure de l'extrudeuse ou peut alimenter directement l'extrudeuse. Le transport de la poudre est pneumatique et se fait au moyen de l'azote.



Figure 22 : Silos de stockage de la poudre



Figure 23: Silos de stockage des granulés



Figure 24 : Silos de stockage de la poudre en vrac

La poudre passe par un système de dosage pour ajouter des additifs (antioxydant, des brillants, ...), le premier doseur est le doseur concentré, mélange une faible quantité de la poudre vierge avec une grande quantité d'additifs, le deuxième doseur est le doseur de dilution, où on ajoute la poudre dosée à des grandes quantités de la poudre vierge. Puis le tout est envoyé vers l'extrudeuse. [19]

La poudre est extrudée sous forme de pellets ou granulés dans l'extrudeuse. La poudre de polymère y est mélangée et fondue, la masse fondue est coupée en pellets d'environ 3,2 mm de diamètre et 2,1mm de longueur. Les granulés de sortie de l'extrudeuse, après séchage, se déchargent dans les silos mélangeurs, puis dans les silos de produit finis ou bien le silo hors spécification, moyennant le transport pneumatique avec de l'air.

Les granulés sont ensuite envoyés des silos mélangeurs ou du silo de produit hors spécifications vers les silos de stockage de granulés pour être commercialisés en vrac ou vers les silos d'alimentation des lignes d'ensachage, par transport pneumatique avec de l'air. [19]



**Figure 25 : Principaux compartiments de l'extrudeuse**

**Figure 26 : Stockage du produit fini**

### **Conclusion :**

Le processus décrit n'est pas uniforme pour l'obtention de tous les grades, certains grades sont davantage produits que d'autres, ce qui s'explique par la nécessité pour CP2K de suivre les tendances du marché afin de répondre à la demande de ses clients. Toute la production de CP2K est soumise à des tests de conformité assurant la qualité requise pour la fabrication des produits finis.

Au fil du temps, l'expérience acquise par le personnel a conduit à apporter occasionnellement des ajustements, principalement dans le contrôle des paramètres tels que la température et le taux de solides dans le réacteur. Ces ajustements sont réalisés dans le but d'obtenir un produit conforme aux normes requises.

# **Chapitre V : problématique et proposition de solution**

## **Introduction :**

La consommation d'isobutane à CP2K varie au fil du temps. Ce dernier est censé être récupéré à 98%. Cependant, au cours des dernières années, l'unité CP2K a consommé des quantités considérables d'isobutane frais, ce qui a entraîné une diminution du de récupération. Cela est dû principalement au vieillissement et au dysfonctionnement de certains équipements dysfonctionnement.

Notre travail consiste à améliorer le taux de récupération de l'isobutane dans l'unité. Afin d'atteindre cet objectif, nous commençons par calculer les bilans de matières du réacteur, de la chambre de flash, de la colonne de purification, de l'accumulateur impliquées dans le système de purification et de récupération de l'isobutane, afin de déterminer la composition réelle entrante dans la section de purification. Ensuite, nous proposons une solution pratique qui pourrait être adaptée à notre problème afin d'augmenter le taux de récupération de l'isobutane .Enfin, nous concluons avec une simulation ayant des résultats prometteurs susceptibles de répondre au problème.

## **v.1. Calculs et résultats :**

### **V.1.1. Bilan de matière :**

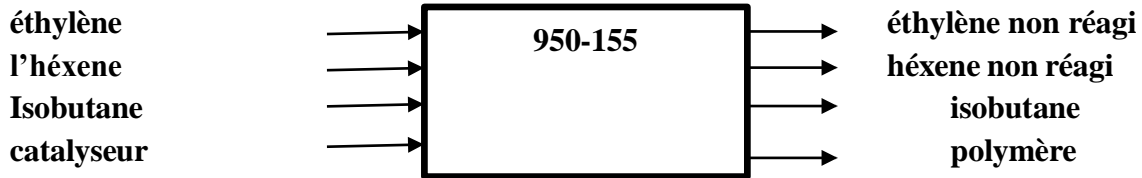
Dans cette partie, on va effectuer les bilans de matières des 4 équipements principaux du procédé qui sont : Le réacteur, la chambre de flash, la colonne de purification et l'accumulateur d'isobutane.

L'étude a été faite pour le PEHD grade 5502 le plus produit par l'unité CP2K. Pour effectuer le calcul des bilans on a utilisé les valeurs correspondantes aux dates suivantes 23, 24,25 et 28/12/2023.

<b>Charge kg/h</b>	<b>Isobutane</b>	<b>Ethylène</b>	<b>Héxène</b>
<b>23/12/2023</b>	8400	7200	15
<b>24/12/2023</b>	8300	7200	15
<b>25/12/2023</b>	7900	7200	13
<b>28/12/2023</b>	8000	7200	15
<b>La moyenne</b>	8150	7200	14.5

**Tableau 4: Débit alimentation du réacteur**

**V.1.1.1. Bilan de matière du réacteur :**



❖ **Débit de l'éthylène :**  $\dot{m}=7200\text{kg/h}$

Taux de conversion d'éthylène  $X_{\text{éth}}=96\%$

❖ **Débit d'éthylène non réagi :**

$$\dot{m}_{\text{éth n R}} = (1 - X_{\text{éth}}) * \dot{m}_{\text{éth}} = (1 - 0,96) * 7200 = 288\text{kg/h}$$

❖ **Débit d'héxène :**  $\dot{m}_{\text{hex}}=14,5\text{kg/h}$

Taux de conversion d'héxène  $X_{\text{hex}}=66\%$

❖ **Débit d'hexène non réagi :**

$$\dot{m}_{\text{hex n R}} = (1 - X_{\text{hex}}) * \dot{m}_{\text{hex}} = (1 - 0,66) * 14,5 = 4,93\text{kg/h}$$

❖ **Débit de catalyseur :**

0,5kg du catalyseur —————→ 1000kg d'éthylène

$\dot{m}_{\text{cat}}$  —————→ 7200 kg d'éthylène

$$\dot{m}_{\text{cat}} = \frac{7200 \times 0,5}{1000} = 3,6\text{kg/h}$$

❖ **Débit du polymère formé :**

**Débit du polymère=** Débit d'éthylène réagi + Débit d'héxène réagi + quantité de catalyseur

$$\text{Débit du polymère} = (7200 * 0,96) + (14,5 * 0,66) + 3,6 = 6928,47\text{kg/h}$$

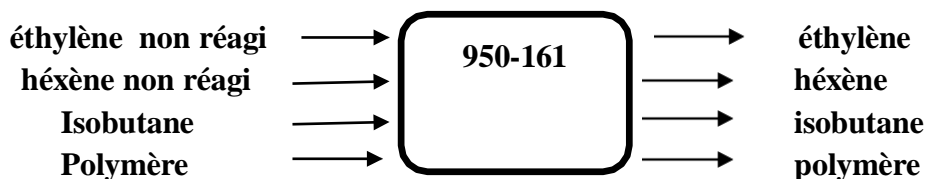
Les résultats du bilan de matière sont résumés dans le tableau suivant :

Composition	Entrée du réacteur		Sortie du réacteur	
	Composition massique	Débits massiques (kg/h)	Composition massique	Débits massiques (kg/h)
<b>Ethylène</b>	0.4756	7200	0.019	288
<b>Isobutane</b>	0.5250	8150	0.5250	8150
<b>Héxène</b>	0.0005	14.5	0.0003	4.93
<b>Catalyseur</b>	0.0002	3.6	0	0
<b>Polymère</b>	0	0	0.4580	6928.47
<b>Total</b>	1	15368.1	1	15371.4

**Tableau 5 : Résultats du bilan de matière du réacteur**

**V.1.1.2. Bilan de matière de la chambre de flash :**

Suite à une détente rapide dans la chambre de flash, où la pression passe de 42 kg/cm<sup>2</sup> à 0,37 kg/cm<sup>2</sup>, les gaz se séparent du polymère par évaporation. Il est à noter qu'une certaine quantité de poudre est toujours entraînée avec les gaz, nécessitant ainsi une séparation supplémentaire. De même, il est nécessaire de séparer les composés non solides présents dans les pores de la poudre qui s'écoule par le fond de la chambre de flash.



a) **Bilan de matière par rapport à l'éthylène :**

❖ **Débit de l'éthylène entrant :**

La charge qui entre dans la chambre de flash contient 1,88% d'éthylène

$$\dot{m}_{\text{éth entrée CF}} = \dot{m}_{\text{éth n R}} = 288 \text{ kg/h}$$

❖ **Débit de l'éthylène sortant de la tête de la chambre de flash :**

44,5 % du débit d'entrée monte au sommet de la chambre et la fraction de l'éthylène dans le courant gazeux de tête de la chambre est de 3,48%

$$\dot{m}_{\text{tête CF}} = 0.445 * \dot{m}_{\text{entrée CF}} = 0.445 * 15371.4 = 6840.273 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{éth tête CF}} = \dot{m}_{\text{tête CF}} * 0.0348 = 6840.273 * 0.0348 = 238.0415 \text{ kg/h}$$

❖ **Débit de l'éthylène sortant du fond de la chambre de flash :**

$$\dot{m}_{\text{éth fond CF}} = \dot{m}_{\text{éth entrée CF}} - \dot{m}_{\text{éth tête CF}} = 288 - 238.0415 = 49.9585 \text{ kg/h}$$

b) **Bilan de matière par rapport à l'isobutane :**

❖ **Débit de l'isobutane entrant :**

La charge qui entre dans la chambre de flash contient 53,10 % en isobutane

$$\dot{m}_{\text{iso}} = 8150 \text{ kg/h}$$

❖ **Débit de l'isobutane sortant de la tête de la chambre de flash :**

La fraction de l'isobutane dans le courant gazeux de tête est de 93,96 %

$$\dot{m}_{\text{iso tête CF}} = \dot{m}_{\text{tête CF}} * 0,9396 = 6840.273 * 0,9396 = 6427.1205 \text{ kg/h}$$

❖ **Débit de l'isobutane sortant du fond de la chambre de flash :**

La fraction de l'isobutane dans le courant du fond est de 2,62%

$$\dot{m}_{\text{iso fond CF}} = \dot{m}_{\text{iso CF}} - \dot{m}_{\text{iso tête CF}} = 8150 - 6427.1205 = 1722.8795 \text{ kg/h}$$

c) **Bilan de matière par rapport à l'héxène :**

❖ **Débit de l'héxène entrant :**

La charge qui entre dans la chambre de flash contient 0,03% en hexène

$$\dot{m}_{\text{hex}} = 4.93 \text{ kg/h}$$

❖ **Débit de l'héxène sortant de la tête de la chambre de flash :**

La fraction de l'héxène dans le courant gazeux de tête est de 0.07%

$$\dot{m}_{\text{hex tête CF}} = \dot{m}_{\text{tête CF}} \times 0.0007 = 6840.273 \times 0.0007 = 4.7881 \text{ kg/h}$$

❖ **Débit de l'héxène sortant du fond de la chambre de flash :**

$$\dot{m}_{\text{hex fond CF}} = \dot{m}_{\text{hex CF}} - \dot{m}_{\text{hex tête CF}} = 4.93 - 4.7881 = 0.1419 \text{ kg/h}$$

**d) Bilan de matière par rapport au polymère :**

❖ **Débit du polymère entrant :**

La charge qui entre dans la chambre de flash contient 45.09 % en polymère

$$\dot{m}_{\text{poly CF}} = 6928.47 \text{ kg/h}$$

❖ **Débit du polymère sortant de la tête de la chambre de flash :**

La fraction du polymère dans le courant gazeux de tête est de 2,35 %

$$\dot{m}_{\text{poly tête CF}} = \dot{m}_{\text{tête CF}} * 0.0235 = 6840.273 = \mathbf{160.746 \text{ kg/h}}$$

❖ **Débit du polymère sortant du fond de la chambre de flash :**

La fraction du polymère dans le fond de la chambre de flash est de 96.89 %

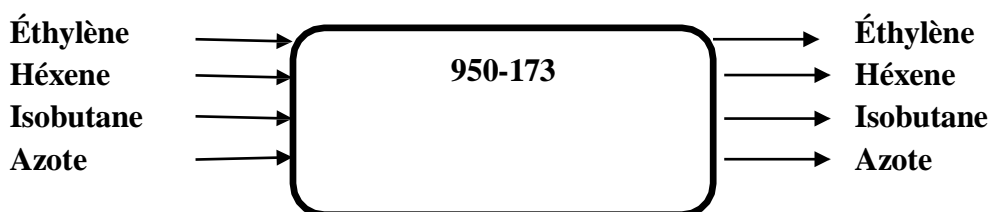
$$\dot{m}_{\text{poly fond CF}} = \dot{m}_{\text{poly CF}} - \dot{m}_{\text{poly tête CF}} = 9628.47 - 160.724 = \mathbf{9467.746 \text{ kg/h}}$$

Les résultats du bilan de matière sont résumés dans le tableau suivant :

Compositions	Entrée de la chambre de flash (100%)		sortie de tête de la chambre de flash (54,25%)		Sortie du fond de la Chambre de flash (45,75%)	
	Composition Massique	Débits massiques kg/h	Composition massique	Débits massiques kg/h	Composition Massique	Débits massiques kg/h
<b>Ethylène</b>	0,0188	288	0,03149	238.0415	0,0062	49.9585
<b>Isobutane</b>	0,5310	8150	0,9396	6427.1205	0.0262	1722.8795
<b>Hexène</b>	0,0003	4.93	0,0007	4.7881	0,0001	0.1419
<b>Catalyseur</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Polymère</b>	0,4509	6928.47	0,0214	160.746	0.9689	6767.724
<b>Total</b>	1	15371.4	1	6830.6961	1	8540.7039

**Tableau 6 : Résultats du bilan de matière de la chambre de flash**

**V.1.1.3. Bilan de matière de la colonne de purification :**



Le courant gazeux de la tête de la chambre de flash passe par trois filtres successifs (cyclone, filtre à manches, filtre de garde) pour éliminer toute trace de la poudre dans le gaz.

$$\dot{m}_{\text{poly CP}} = 0 \text{ kg/h}$$

Ces filtres fonctionnent avec de l'azote, donc il y a apparition de ce dernier dans le courant gazeux, le débit de l'azote est évalué à :

$$\dot{m}_{\text{N}_2 \text{ CP}} = 38.2 \text{ kg/h}$$

Donc, le débit du gaz qui alimente la colonne de purification est calculé comme suit :

$$\dot{m}_{\text{gaz CP}} = \dot{m}_{\text{tête CF}} + \dot{m}_{\text{N}_2 \text{ CP}} - \dot{m}_{\text{poly CF}} = 6840.273 + 38.2 - 160.746 = 6717.727 \text{ kg/h}$$

On recalcule ensuite la composition du gaz après élimination de la poudre et l'introduction de l'azote.

Composition	Sortie de tête de la chambre de Flash	
	Composition Massique	Débits Massiques kg/h
Ethylène	0,03140	238.0415
Isobutane	0,9380	6427.1205
Hexène	0,0006	4.7881
Azote	0,0045	38.2
Polymère	0	0
<b>Total</b>	1	6708.1501

**Tableau 7 : Composition du gaz après élimination de la poudre et l'introduction de l'azote**

**a) Le reflux de la colonne de purification :**

❖ Le débit du reflux de la colonne de purification est de :  $\dot{m}'_{\text{ref,CP}} = 6453.19 \text{ kg/h}$

Composition	Fraction massique	Débit kg/h
Ethylène	0,0692	470.28
Isobutane	0,9189	5970.36
Azote	0.0029	12,55
<b>Total</b>	1	6453.19

**Tableau 8 : Composition de reflux de la tête de la colonne de purification**

- ❖ Donc le débit total qui entre dans la colonne est la somme du débit d'alimentation et du débit du reflux :

$$\dot{m}_{\text{total entrée CP}} = \dot{m}_{\text{alim CP}} + \dot{m}_{\text{ref CP}}$$

$$\dot{m}_{\text{total entrée CP}} = 6717.727 + 6453.19 = \mathbf{13170.917} \text{ kg/h}$$

- ❖ Le débit d'éthylène entrant dans la colonne est la somme de l'éthylène de l'alimentation et l'éthylène du reflux :

$$\dot{m}_{\text{éth entrée CP}} = \dot{m}_{\text{éth alim CP}} + \dot{m}_{\text{éth ref CP}}$$

$$\dot{m}_{\text{éth entrée CP}} = 238.0415 + 470.28 = \mathbf{708.3215} \text{ kg/h}$$

- ❖ Le débit d'isobutane entrant dans la colonne est la somme de l'isobutane de l'alimentation et de l'isobutane du reflux :

$$\dot{m}_{\text{iso entrée}} = \dot{m}_{\text{iso alim CP}} + \dot{m}_{\text{iso ref CP}}$$

$$\dot{m}_{\text{iso entrée CP}} = 6427.1205 + 5970.36 = \mathbf{12397.49} \text{ kg/h}$$

- ❖ Le débit d'azote entrant dans la colonne est la somme de l'azote de l'alimentation et de l'azote du reflux :

$$\dot{m}_{\text{N2 entrée CP}} = \dot{m}_{\text{N2 alim CP}} + \dot{m}_{\text{N2 ref CP}}$$

$$\dot{m}_{\text{N2 entrée CP}} = 38.2 + 12.55 = \mathbf{50.75} \text{ kg/h}$$

**Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :**

La composition	Alimentation de la colonne de purification Venant de CF		Reflux de la colonne de purification		Entrée totale de la colonne de Purification	
	Fraction massique	Débit kg/h	Fraction Massique	Débit kg/h	Fraction Massique	Débit kg/h
<b>Ethylène</b>	0,03140	238.0415	0,0692	470.28	0,0540	708.3215
<b>Isobutane</b>	0,9380	6427.1205	0,9189	5970.36	0,9452	12397.49
<b>Hexène</b>	0,0007	4.7881	0	0	0,0015	4.7881
<b>Azote</b>	0,0045	38.2	0.0029	12,55	0,0030	50.75
<b>Total</b>	1	6708.1501	1	6453.19	1	13209.8596

**Tableau 9 : Résultats des calculs de l'alimentation de la colonne de purification**

**b) Bilan de matière par rapport à l'éthylène :**

51,22% du débit total d'entrée monte au sommet de la colonne 48,62% de ce débit est soutiré latéralement et 0,16% va au fond de la colonne.

La fraction de l'éthylène est de 10,05% dans le courant gazeux de tête, 0,68% dans le soutirage et 6,46 % dans le produit du fond de la colonne.

❖ **Débit de l'éthylène sortant de la tête de la colonne :**

$$\dot{m}_{\text{tête CP}} = 0,5122 \times \dot{m}_{\text{entrée CP}} = 0,5158 \times 13170,917 = \mathbf{6746,1436 \square \square /h}$$

$$\dot{m}_{\text{éth tête CP}} = 0,1006 \times \dot{m}_{\text{tête CP}} = 6746,1436 \times 0,1006 = \mathbf{678,6620 \square \square /h}$$

❖ **Débit de l'éthylène dans le soutirage latéral de la colonne :**

$$\dot{m}_{\text{Soutirage CP}} = 0,4862 \times \dot{m}_{\text{entrée CP}} = 0,4862 \times 13170,917 = \mathbf{6403,699 \square \square /h}$$

$$\dot{m}_{\text{éth Soutirage CP}} = 0,0068 \times \dot{m}_{\text{tête CP}} = 0,0068 \times 6746,1436 = \mathbf{43,5451 kg/h}$$

❖ **Débit de l'éthylène sortant du fond de la colonne :**

$$\dot{m}_{\text{fond CP}} = \dot{m}_{\text{entrée CP}} \times 0,0016 = 13170,917 \times 0,0016 = \mathbf{21,073 kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{éth fond CP}} = 0,0646 \times \dot{m}_{\text{fond CP}} = 0,0646 \times 21,073 = \mathbf{1,36 \square \square /h}$$

**c) Bilan de matière par rapport à l'isobutane :**

❖ **Débit de l'isobutane entrant :**

$$\dot{m}_{\text{iso entrée}} = \dot{m}_{\text{iso tête CP}} = \mathbf{6427,1205 kg/h}$$

❖ **Débit de l'isobutane sortant de la tête de la colonne :**

La fraction de l'isobutane dans le courant gazeux de tête est de 89,44% :

$$\dot{m}_{\text{iso tête CP}} = 0,8944 \times \dot{m}_{\text{tête CP}} = 0,8944 \times 6746,1436 = \mathbf{6033,75 \square \square /h}$$

❖ **Débit de l'isobutane sortant du fond de la colonne :**

La fraction de l'isobutane dans le courant liquide du fond est de 19,25 % :

$$\dot{m}_{\text{iso fond CP}} = 0,1925 \times \dot{m}_{\text{fond CP}} = 0,1925 \times 21,073 = \mathbf{4,05 kg/h}$$

❖ **Débit de l'isobutane dans le soutirage latéral de la colonne :**

La fraction de l'isobutane dans le soutirage est de 99,31%

$$\dot{m}_{\text{iso Soutirage CP}} = 0,9931 \times \dot{m}_{\text{Soutirage CP}} = 0,9931 \times 6403,699 = \mathbf{6359,513 kg/h}$$

**d) Bilan de matière par rapport à l'hexène :**

Le débit de l'hexène entrant dans la colonne de purification est de 4.7881 kg/h avec une fraction de 0.07 % du débit total. Vu que l'hexène est plus lourd par rapport aux autres composés à la température et à la pression de fonctionnement de la colonne (110°C, 13,4 kg/cm<sup>2</sup>g), il va totalement vers le fond de la colonne avec une fraction dans le débit du fond de la colonne de 7.15%, on a donc :

$$\dot{m}_{\text{hex tête CP}} = 0$$

$$\dot{m}_{\text{hex Soutirage CP}} = 0$$

$$\dot{m}_{\text{hex fond CP}} = \dot{m}_{\text{Soutirage CP}} \times 0.0715 = 21.073 \times 0.0715 = \mathbf{1.50674 \text{ kg/h}}$$

**e) Bilan de matière par rapport à l'azote :**

Le débit de l'azote dans le débit total entrant à la colonne de purification est de 50.75 kg/h avec une fraction de 0.0030 %. Etant donné que l'azote est moins dense que les autres composés à la température et à la pression de fonctionnement de la colonne (110°C, 13,4 kg/cm<sup>2</sup>g), il monte totalement vers le haut de la colonne avec une fraction de 0.50 % dans le débit de tête, donc :

$$\dot{m}_{\text{N2 Soutirage CP}} = 0$$

$$\dot{m}_{\text{N2 fond CP}} = 0$$

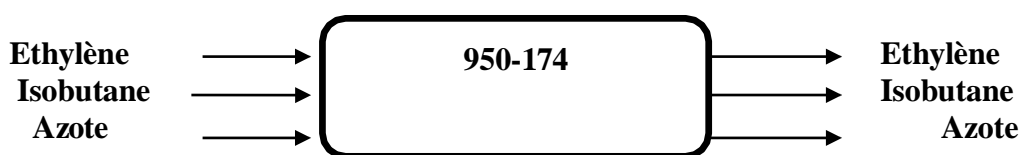
$$\dot{m}_{\text{N2 tête CP}} = \dot{m}_{\text{tête CP}} \times 0.005 = \mathbf{33.7307 \text{ kg/h}}$$

Les résultats du bilan de matière de la colonne de purification sont regroupés dans le tableau suivant :

La composition	Entrée totale de la colonne de purification		Sortie de la tête de la colonne de purification 51,22 %		Soutirage latéral de la colonne 48,62 %		Sortie du fond de la colonne de purification 0,16 %	
	Fraction massique	Débit kg/h	Fraction massique	Débit kg/h	Fraction massique	Débit kg/h	Fraction massique	Débit kg/h
Ethylène	0,0540	708.3215	0,1005	678.6620	0,0068	43.5451	0,0646	1.36
Isobutane	0,9452	12397.49	0,8944	6933.75	0,9931	6359.513	0,1925	4.05
Hexène	0,0015	4.7881	0	0	0	0	0,0715	1.506
Azote	0,0030	50.75	0,0050	33.7307	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>13209.8596</b>	<b>1</b>	<b>7646.1427</b>	<b>1</b>	<b>6403.0581</b>	<b>1</b>	<b>6.916</b>

**Tableau 10 : Résultats du bilan de matière de la colonne de purification**

**V.1.1.4. Bilan de matière de l'accumulateur de l'isobutane :**



Le débit de l'off-gas qui sort de la tête de l'accumulateur est de 323 kg/h (3,39% du débit de l'alimentation), le reste va s'accumuler dans l'accumulateur : 9199 kg/h (96,61% du débit de l'alimentation).

**a) Bilan par rapport à l'éthylène :**

**❖ Débit d'éthylène sortant de la tête de l'accumulateur :**

La fraction de l'éthylène dans l'off-gas est de: 83,74%

$$\dot{m}_{\text{éth tête accum}} = \dot{m}_{\text{tête}} \times 0.8374 = 323 \times 0.8374 = \mathbf{270.480 \text{ kg/h}}$$

**❖ Débit d'éthylène sortant du fond de l'accumulateur :**

La fraction de l'éthylène dans le reflux de tête de la colonne de purification est de : 7,48%

$$\dot{m}_{\text{éth fond accum}} = \dot{m}_{\text{fond accum}} \times 0.0748 = 9199 \times 0.0748 = 688.08 \text{ kg/h}$$

**b) Bilan par rapport à l'isobutane :**

**❖ Débit d'isobutane sortant de la tête de l'accumulateur :**

La fraction de l'isobutane dans l'off-gas est de : 4,67%

$$\dot{m}_{\text{iso tête accum}} = \dot{m}_{\text{iso accum}} \times 0.0467 = 323 \times 0.0467 = \mathbf{15.08 \text{ kg/h}}$$

**❖ Débit d'isobutane sortant du fond de l'accumulateur :**

La fraction de l'isobutane dans le reflux de tête de la colonne de purification est de: 92,39%

$$\dot{m}_{\text{iso fond accum}} = \dot{m}_{\text{fond}} \times 0.9239 = 9199 \times 0.9239 = \mathbf{8498.96 \text{ kg/h}}$$

**c) Bilan par rapport à l'azote :**

**❖ Débit d'azote sortant de la tête de l'accumulateur :**

La fraction de l'azote dans l'off-gas est de : 11,58 %

$$\dot{m}_{\text{N2 tête accum}} = \dot{m}_{\text{tête accum}} \times 0.1158 = 323 \times 0.1158 = \mathbf{36.0145 \text{ kg/h}}$$

**❖ Débit d'azote sortant du fond de l'accumulateur :**

La fraction de l'azote dans le reflux de fond de la colonne de purification est de : 0.13 %

$$\dot{m}_{\text{N2 fond accum}} = \dot{m}_{\text{fond}} \times 0.0013 = 9199 \times 0.0013 = \mathbf{11.9 \text{ kg/h}}$$

Les résultats du bilan de matière de l'accumulateur de l'isobutane sont regroupés dans le tableau suivant :

La composition	Alimentation de l'accumulateur		Tête de l'accumulateur (off-gas)		Fond de l'accumulateur (reflux)	
	Fraction Massique	Débit kg/h	Fraction Massique	Débit kg/h	Fraction massique	Débit kg/h
<b>Ethylène</b>	0,1005	678.6620	0,8374	270.480	0.0748	688.08
<b>Isobutane</b>	0,8944	6933.75	0,0467	15.08	0.9239	8498.96
<b>Azote</b>	0,0050	33.7307	0, 1158	36.0145	0.0013	11.95
<b>Total</b>	1	7646.1427	1	321.5745	1	9199

**Tableau 11: Bilan de matière de l'accumulateur de l'isobutane**

**V.1.1.5. Vérification des paramètres de fonctionnement de l'accumulateur à l'aide du logiciel HYSYS :**

La simulation du système a donné les résultats suivants :

La composition	Tête de l'accumulateur (off-gas)	
	Fraction Massique	Débit kg/h
<b>Ethylène</b>	0,8382	269 ,40
<b>Isobutane</b>	0,0467	15,01
<b>Azote</b>	0,1151	36,99
<b>Total</b>	1	321,40

**Tableau 12 : Résultats de la simulation HYSYS de l'accumulateur de l'isobutane**

On remarque que les compositions du design simulé et réel sont quasi identiques, ce qui montre que nos résultats sont bons, cela nous permet de les comparer avec les analyses effectuées en laboratoire avec CP2K pour évaluer les pertes en isobutane.

La composition	Tête de l'accumulateur (off-gas)-design simulé		Tête de l'accumulateur (off-gas) - analyses		écart
	Fraction massique	Débit kg/h	Fraction Massique	Débit kg/h	Débit kg/h
Température de sortie(°C)	-29.2		10		-
Pression (kg/cm <sup>2</sup> -g)	12.8		12.45		-
Ethylene	0,8382	269 ,40	0,6255	277 ,22	7,82
Isobutane	0,0467	15,01	0,2698	127,65	<b>112,64</b>
Azote	0,1151	36,99	0,0998	37,13	0,14
<b>Total</b>	1	321,40	1	442,00	-

**Tableau 13 : Comparaison entre les résultats de la simulation et données réelles**

D'après ce tableau on va déterminer le taux de récupération de l'isobutane dans les deux cas en utilisant la formule la suivante :

$$\tau \text{ isobutane} = \frac{\text{débit iso entrant colonne a garnisage} - \text{débit iso off gas}}{\text{débit iso entrant colonne a garnisage}}$$

Les valeurs du tableau ci-dessous sont celles du débit entrant dans la colonne à garnissage de l'accumulateur de l'isobutane

Compositions	Composition Massique	Débit massique (kg/h)
Ethylène	0,5440	429,87
Isobutane	0,3886	<b>307,07</b>
Azote	0,0674	53,26
<b>Total</b>	1	790,2

**Tableau 14 : Débits et compositions massiques du flux gazeux entrant dans la colonne à garnissage**

$$\tau \text{ isobutane design} = \frac{307,7-15,01}{307,07} = 0.9511$$

$$\tau \text{ isobutane design}=95,11\%$$

$$\tau \text{ isobutane cas actuel} = \frac{307,07-127,65}{307,07} = 0.5843$$

$$\tau \text{ isobutane cas actuel}=58.43\%$$

### ❖ discussions des résultats :

Dans le cas de dysfonctionnement, nous constatons que la quantité d'isobutane dans l'off-gas dépasse largement la norme de 15,01 kg/h pour atteindre 127,65 kg/h. Pour un même débit entrant dans la colonne à garnissage, le taux de récupération de l'isobutane dans le cas du mauvais fonctionnement est supérieur à celui du cas de design. Cela révèle quelques points importants :

- **Refroidissement insuffisant** : La quantité de froid fournie n'est pas suffisante pour refroidir l'isobutane, empêchant ainsi la condensation et la récupération selon les directives du fabricant.

- **Perte accrue en isobutane** : La perte d'isobutane est plus importante que prévu, une situation loin d'être souhaitable. Cela non seulement augmente les coûts opérationnels nécessitant l'achat d'isobutane frais, mais annonce également des risques environnementaux associés à des problèmes de sécurité.

### V.1.2. Proposition et étude de solution :

Pour résoudre le problème de récupération inefficace de l'isobutane, nous proposons la solution suivante:

- ❖ Installation d'un échangeur de chaleur et d'un ballon séparateur

#### Installation d'un échangeur de chaleur et d'un ballon séparateur :

- **Idée principale :**

Refroidir l'off-gas sortant du condenseur de tête de l'accumulateur d'isobutane pour tenter de condenser une partie de l'isobutane et ainsi stimuler la récupération.

- **Description de la solution :**

L'échangeur de chaleur sert à baisser la température des gaz d'échappement déjà froids (qui entrent à 10°C) à une température encore plus basse de -20°C. En traversant l'échangeur, les effluents gazeux sont encore chargés d'une quantité considérable d'isobutane qu'ils entraînent. Mais le transfert de chaleur avec le propane de refroidissement au sein de l'échangeur, permet la condensation d'une partie de l'isobutane contenu dans les effluents gazeux.

Le ballon séparateur a pour fonction de séparer le mélange liquide-gaz issu de l'échangeur thermique. Une fois ce mélange refroidi, il pénètre dans le ballon séparateur où la phase gazeuse est évacuée par le haut et contient très peu d'isobutane tandis que la phase liquide se dépose au fond du

ballon. Ce processus d'enrichissement conduit à une récupération accrue d'isobutane, ce qui minimise les pertes et améliore l'efficacité de l'opération.

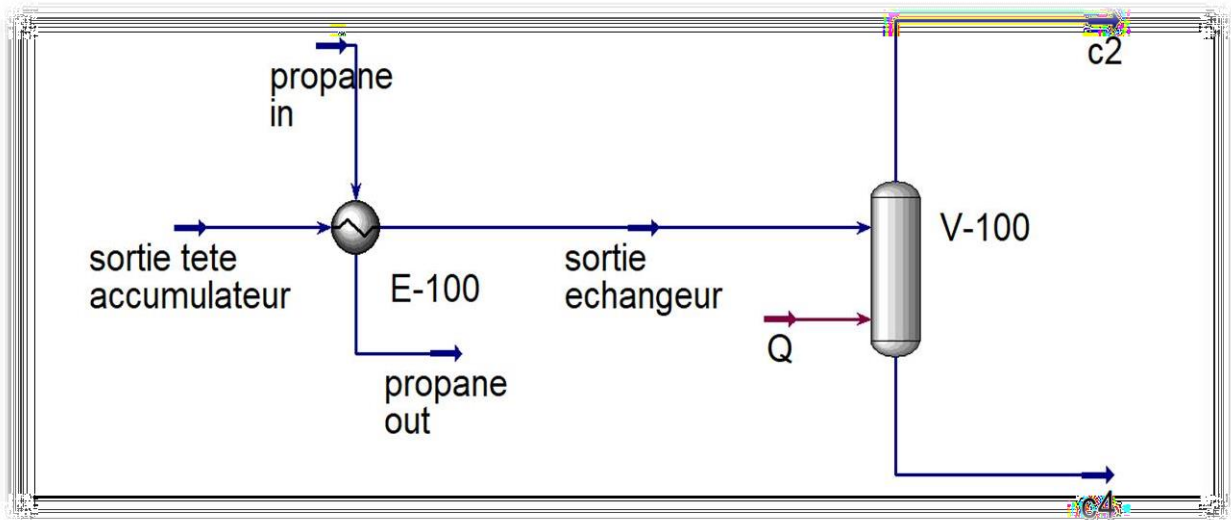


Figure 27 : Schéma de simulation de l'accumulateur + échangeur de chaleur +ballon séparateur

L'échangeur choisi présente les caractéristiques suivantes :

Sizing Data	
<input checked="" type="radio"/> Overall	<input type="radio"/> Shell <input type="radio"/> Tube
<input type="checkbox"/> Accept any input data	

Configuration	
Number of Shell Passes	1
Number of Shells in Series	1
Number of Shells in Parallel	1
Tube Passes per Shell	2
Exchanger Orientation	Horizontal
First Tube Pass Flow Direction	Counter
Elevation (Base)	0,0000

Calculated Information	
Shell HT Coeff [kJ/h-m <sup>2</sup> -C]	<empty>
Tube HT Coeff [kJ/h-m <sup>2</sup> -C]	<empty>
Overall U [kJ/h-m <sup>2</sup> -C]	44,46
Overall UA [kJ/C-h]	2682
Shell DP [kPa]	0,0000
Tube DP [kPa]	0,0000
Heat Trans. Area per Shell [m <sup>2</sup> ]	60,32
Tube Volume per Shell [m <sup>3</sup> ]	0,1930
Shell Volume per Shell [m <sup>3</sup> ]	2,272

TEMA Type **A** E L

Figure 28 : caractéristiques générales de l'échangeur de chaleur choisi

Sizing Data  
 Overall  Shell  Tube  Accept any input data

Shell and Tube Bundle Data

Shell Diameter [mm]	739,05
Number of Tubes per Shell	160
Tube Pitch [mm]	50,00
Tube Layout Angle	Triangular (30 degrees)
Shell Fouling [C-h-m2/kJ]	0,000000

Shell Baffles

Shell Baffle Type	Single
Shell Baffle Orientation	Horizontal
Baffle Cut (%Height) [%]	20,00
Baffle Spacing [mm]	800,00

Figure 29 : caractéristique de l'échangeur de chaleur choisi coté calandre

Sizing Data  
 Overall  Shell  Tube  Accept any input data

Dimensions

OD [mm]	20,000
ID [mm]	16,000
Tube Thickness [mm]	2,000
Tube Length [m]	6,000

Tube Properties

Tube Fouling [C-h-m2/kJ]	0,000000
Thermal Cond. [W/m-K]	45,00
Wall Cp [kJ/kg-C]	<empty>
Wall Density [kg/m3]	<empty>

Figure 30 : caractéristiques générales de l'échangeur de chaleur choisi coté calandre

Worksheet	Mole Fractions	Vapour Phase	Liquid Phase	
Conditions				
Properties				
Composition				
Oil & Gas Feed				
Petroleum Assay				
K Value				
User Variables				
Notes				
Cost Parameters				
Normalized Yields				
	i-Butane	0,0484	0,0484	0,5504
	Nitrogen	0,1566	0,1566	0,0050
	Ethylene	0,7949	0,7949	0,4446
	Propane	0,0000	0,0000	0,0000
	Total	1,00000		

Figure 31 : La composition du nouveau off-gas obtenu par simulation HYSYS

Le tableau ci-dessous représente une comparaison des compositions de l'off-gas des deux systèmes, avant et après la modification :

La composition	Tête de l'accumulateur (offgas)-analyses		Tête de l'accumulateur (off-gas)-modifié		Écart
	Fraction Massique	Débit kg/h	Fraction massique	Débit kg/h	Débit kg/h
Température De sortie°C	10		-20		-
Pression kg/cm <sup>2</sup> -g	12.8		12.8		-
Ethylène	0,6272	277,22	0.7949	147.05	130.17
Isobutane	0,2888	127,65	0.0484	8.95	<b>118.70</b>
Azote	0,0840	37,13	0.1566	28.97	8.16
<b>Total</b>	1	442,00	1	185	/

**Tableau 15 : Résultats comparatifs de la simulation: accumulateur+échangeur de chaleur+ballon séparateur et le cas réel existant au niveau de CP2K**

**Interprétation des résultats :**

Suite aux modifications apportées, on remarque que l'off-gas présente une concentration réduite en isobutane, tandis que la proportion d'éthylène y est plus élevée. En conséquence, la quantité d'isobutane pouvant être récupérée est de 118.70 kg/h réduisant ainsi les pertes à seulement 8.95 kg/h.

**Calcul du taux de récupération de l'isobutane :**

Le taux de récupération de l'isobutane dans l'accumulateur est déterminé dans ce cas à l'aide des valeurs rapportées dans le tableau suivant :

Composition	Composition Massique	Débit massique (kg/h)
Ethylène	0,5694	496,00
Isobutane	0,3677	<b>325.98</b>
Azote	0,0629	54,80
<b>Total</b>	1	786.78

**Tableau 16 : Débits et compositions massiques du flux gazeux entrant dans la colonne à garnissage**

$$\tau \text{ isobutane} = \frac{\text{debit}_{\text{iso entrant colonne a garnisage}} - \text{debit}_{\text{iso off gas}}}{\text{debit}_{\text{iso entrant colonne a garnisage}}}$$

$$\tau \text{ isobutane modifié} = \frac{325.98 - 8.95}{325.98} = 0.973$$

$$\tau \text{ isobutane modifié} = 97.30 \%$$

### • Discussion des résultats :

Grâce à cette installation, nous avons réussi à récupérer 317.03 kg/h à partir d'un débit entrant d'isobutane de 325,98 kg/h (8.95 kg/h d'isobutane dans l'off gas), ce qui se traduit par un taux de récupération de 97.30 %. Ce résultat dépasse largement le taux calculé en cas de mauvais fonctionnement (58,43 %) et même celui du design (95,11 %).

Cette amélioration significative, avec un taux de récupération de l'isobutane de 97.30, justifie en partie l'éventualité d'opter cette solution afin d'améliorer la rentabilité de l'unité en améliorant la récupération de l'isobutane.

### • Impacts et perspectives :

**Rentabilité améliorée :** L'augmentation des taux de récupération de l'isobutane contribue à augmenter la rentabilité de l'unité, réduisant ainsi les pertes et augmentant les profits.

**Optimisation des processus :** Cette réalisation met en lumière l'importance de l'optimisation des processus dans les installations industrielles en mettant en évidence le potentiel d'amélioration continue pour augmenter l'efficacité opérationnelle.

**Durabilité et responsabilité :** En réduisant les pertes d'isobutane, cette solution contribue également à la durabilité environnementale en minimisant les émissions de gaz à effet de serre et en augmentant la valeur des ressources.

## V.2. Etude économique :

Dans cette partie, on va effectuer une étude économique qui va nous permettre d'évaluer la rentabilité de la réalisation de cette installation.

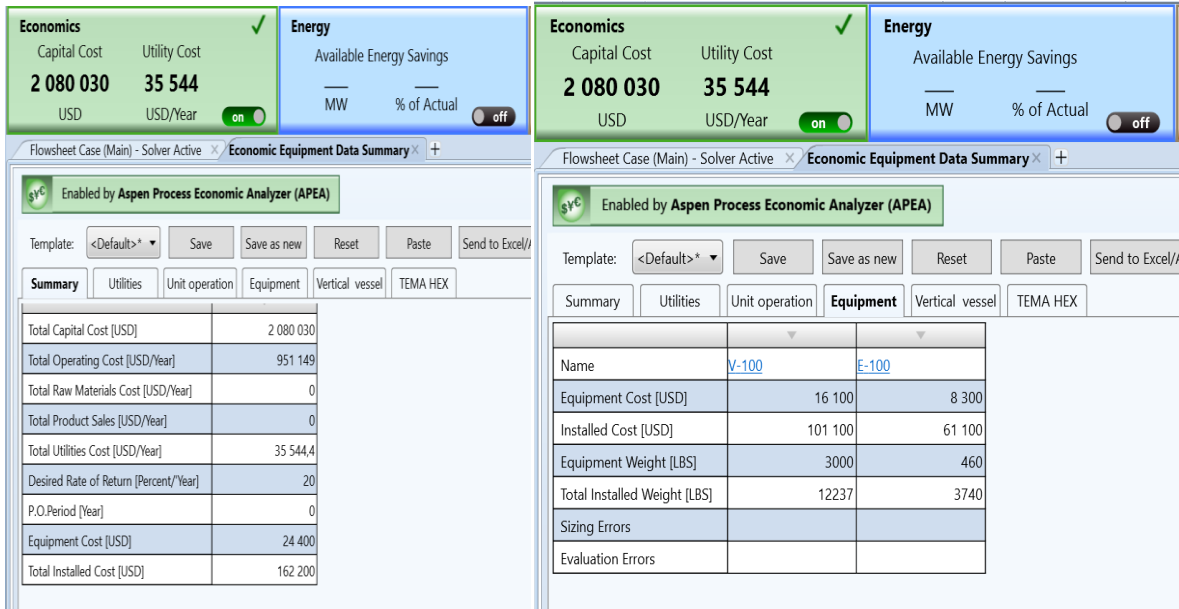
### V.2.1. Cout d'investissement :

Dans le but de déterminer le budget de financement approximatif de cette installation, on a utilisé le logiciel de simulation HYSYS en cliquant sur l'option « Economics » pour avoir une estimation sur le cout d'investissement et le cout d'exploitation qui sont 2266630 dollars et 35544 dollars/an respectivement.

Avec : le cout d'investissement = cout du capital + cout d'achat des Equipements + cout d'installation

➤ **Le cout d'investissement = 2080030+24400+162200 = 2266630 dollars=305995050 dinars**

Les résultats de l'estimation économique sont représentés dans la figure suivante :



**Figure 32 : Résultats de la fonction « Economics »**

### **V.2.2. Calcul des recettes :**

On doit déterminer les gains financiers dans le cas de réalisation de cette installation en fonction du prix de vente actuel de l'isobutane sur le marché mondial. Le prix de l'isobutane actuel est estimé à 4000 dollars/tonnes.

Grâce à cette installation, nous avons réussi à récupérer 317.03 kg/h (2777.18 tonnes/an) à partir d'un débit entrant d'isobutane de 325,98 kg/h.

On a : **la recette = La quantité de l'isobutane récupérée × Le prix de l'isobutane**

❖ **La recette = 2777.18 × 4000 = 11108731.2dollars/an=1499678712 DA/an**

### **V.2.3. Calcul du gain annuel :**

On a : **Le gain annuel = La recette – les charges (dépenses)**

- Les charges = cout d'achat des Equipements + couts opératoires + cout total des utilités + cout d'installation du matériel + une charge d'amortissement annuelle du CAPITAL (Capital cost)
- Avec : la charge d'amortissement annuelle du CAPITAL (Capital cost) qui est égale à :

Cout du capital \* 20% = cout capital / 5 = 2080030 \* 20% = 2080030 / 5 = **416006**

**Donc le gain annuel = 11108731.2 – (24400 + 951149 + 35544.4 + 162200 + 416006 )**

❖ **Le gain annuel = 9519431.8 dollars/an= 1285123293 DA /an**

Taux de récupération de l'isobutane	Quantité d'isobutane récupérée (tonne/an)	Prix d'achat (dollars/tonne)	Recette (DA/an)	Le gain annuel (DA/an)
97.3 %	2777.18	4000	1499678712	<b>1285123293</b>

**Tableau 17 : Calcul du gain financier**

**Interprétation des résultats :**

D'après les calculs effectués, le résultat est positif et donc c'est **un gain**, ce qui signifie que notre projet est rentable. Ceci est dû au fait que la récupération de l'isobutane économise un capital important.

**V.2.4. Calcul des paramètres économiques :**

- **Amortissement** = Cout capital + utilités
- **Bénéfice imposable**= Recette – amortissement – dépenses
- **Résultat brut** = Recette – (OPEX+ cout utilités + amortissement)
- **Résultat après impôt** = Résultat brut × Cout total d'installation après impôt

**Avec :** Cout total d'installation après impôt = **0.6**

- **Cash flow** = Résultat après impôt + amortissement
- **Cash flow actualisé (CFA)** = Cash flow × facteur d'actualisation

**Avec :**

Année	0	1	2	3	4	5
<b>Facteur d'actualisation</b>	1	<b>0,909090909</b>	<b>0,82644628</b>	<b>0,7513148</b>	<b>0,68301346</b>	<b>0,62092132</b>

**Tableau 18: facteur d'actualisation**

- **La valeur actuelle nette (VAN)** = - Cout d'investissement +  $\sum_{n=0} CFA$

	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Année</b>	2024	2025	2026	2027	2028	2029
<b>Recette</b>	1499678712	1499678712	1499678712	1499678712	1499678712	1499678712
<b>Opex</b>	128405115	128405115	128405115	128405115	128405115	128405115
<b>Bénéfice imposable</b>	1228309083	1228309083	1228309083	1228309083	1228309083	1228309083
<b>utilities Cost</b>	4798494	4798494	4798494	4798494	4798494	4798494
<b>Amortissement</b>	56814210	56814210	56814210	56814210	56814210	56814210
<b>Résultat Brut</b>	1309660893	1309660893	1309660893	1309660893	1309660893	1309660893
<b>Résultat après impôt</b>	785796535	785796535	785796535	785796535	785796535	785796535
<b>Cash-flow</b>	842610745	842610745	842610745	842610745	842610745	842610745
<b>Cash-flow actualisé</b>	766009768	696372517	633065924	575514477	575514477	523194978
<b>cout de l'investissement (DA)</b>	305995050	/	/	/	/	/
<b>VAN</b>	2888189595	/	/	/	/	/

**Tableau 19 : Résultats des paramètres économiques**

**Interprétation des résultats :**

D'après les calculs effectués sur la base des données remises par l'entreprise : la VAN (Valeur actuelles Nette) du projet est **positive**. Donc le projet est économiquement rentable.

En conclusion, on peut dire qu'en plus des avantages que le projet apportera à l'entreprise, il permet une rentabilité économique très satisfaisante.

## **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons entrepris une analyse approfondie des bilans de matière de la colonne pour déterminer la composition réelle entrante dans la section de purification .Ensuite, nous avons vérifié les paramètres de fonctionnement de l'accumulateur à l'aide du logiciel de simulation HYSYS, nos résultats montrent un dysfonctionnement au niveau de l'accumulateur entraînant une récupération insuffisante d'isobutane. Pour remédier au problème, nous recommandons d'installer un échangeur de chaleur et un ballon séparateur. Cette solution permet de refroidir efficacement les gaz d'échappement, de favoriser la condensation de l'isobutane, puis de séparer efficacement les phases liquide et gazeuse pour une meilleure récupération. La mise en œuvre de la solution proposée ouvre la voie à une augmentation significative de la rentabilité de l'installation.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale :**

Dans ce travail, nous avons exposé les divers aspects relatifs aux polymères et aux polyéthylènes en général, en décrivant leurs caractéristiques chimiques et physiques, ainsi que le processus Phillips et ses installations de manière détaillée. Parmi les caractéristiques du processus Phillips figure la haute pureté des flux d'alimentation du réacteur, ce qui requiert des installations mentionnées précédemment pour garantir des produits conformes aux spécifications requises.

Au cours de ce stage, nous avons abordé plusieurs problèmes techniques, parmi lesquels le problème de récupération de l'isobutane qui est supposé être récupéré à 98%, mais au cours de ces dernières années l'unité CP2K consomme des quantités importantes en isobutane frais. Le calcul du taux de récupération en se basant sur les paramètres de marche actuels a révélé que ce taux a diminué jusqu'à 58.43 %.

Dans notre étude on a contribué à la résolution de ce problème visant à réduire la concentration de l'isobutane dans l'off-gas et la ramener à celle requise par le design pour des raisons environnementales et économiques. Pour cela nous avons entrepris, à l'aide du logiciel HYSYS, quelques modifications qui ont abouti à des résultats satisfaisants.

Pour atteindre l'objectif assigné à ce travail, on a proposé une solution qui a permis d'atteindre le taux de récupération souhaitée (97.30 %). On peut déduire que cette solution est idéale pour valoriser la rentabilité de l'unité et minimiser les pertes en isobutane.

Enfin, l'étude économique que nous avons entreprise, prouve que l'installation proposée pour résorber le problème du boil-off est très rentable.

# **Références bibliographiques**

## **Références bibliographiques :**

- [1] Chapitre I:Generalites sur les polymeres . (s.d.). Récupéré sur [dspace.ummo.dz](http://dspace.ummo.dz).
- [2] Mansouri. Naima, «hapitre\_i\_structure\_des\_polymeres\_et\_leurs\_classifications.pdf,» [En ligne].
- [3] «difference-between-linear-and-crosslinked-polymer.html#Linear%20Polymère.,» [En ligne].
- [4] Akroum. Lotfi, «Amélioration du taux de récupération de l'isobutane du complexe de Skikda CP2K,» Ecole national polytechnique ENP, 2017 mémoire Master
- [5] N. S. (. A. D. Chimie)., «Comparaison entre les polyéthylènes haute et basse densité,» Nathalie SCHULTZ (2ème Année DUT Chimie). Mars 2000, Mars 2000. [En ligne].
- [6] en ligne. (s.d.). «Le polyéthylène»,. Récupéré sur<http://fr.wikipedia.org/wiki/Polyéthylène>.
- [7] Sadoun. Sofiane, «"effet de la température et de la vitesse de déformation et de vieillissement sur la structure du PEHD ",» Faculté des sciences Université Badji Mokhtar., Annaba, 2018 mémoire Master .
- [8] «quels-sont-les-domaines-d-utilisation-du-polyethylene-pehd-et-quels-sont-ses-atouts,» [En ligne].
- [9] «Qu'est-ce que le polyéthylène et à quoi sert-il ?,» [En ligne] Récupéré sur [nelinkia..](http://nelinkia.com)
- [10] e. B. S. F. DJERIBI Safa, «"Modélisation du procédé de fabrication du polyéthylène haute densité (PEHD)dans l'unité CP2K-Skikda ",» Guelma, juin ,2016.memoire master
- [11] Nouria, M. n. (1996). « Etude physico-chimiques des déchets dePEHD utilisé en emballage alimentaire pour le conditionnement des huiles ». Thèse magistère, Université Bejaia.
- [12] Hamlaoui. Nacira, «« étude expérimentale et numérique de l'évolution de la tenacitéa travers la paroi d'un tube en polyéthylène de type HDPE-100 »,» Université Annaba., 2018.
- [13] [polyethylene-haute-densite-pe-hd-am3315/fabrication-am3315niv10002.html](http://polyethylene-haute-densite-pe-hd-am3315/fabrication-am3315niv10002.html). (s.d.). Récupéré sur <https://www.techniques-ingenieur.fr/>.

- [14] Maidi. Abderrahmane, « « étude comparative de l'analyse physico-chimique et comportement mécanique d'un PEHD réalisées a ALFAPIPE et CP2K Skikda»,» universite de Annaba , 2018.memoire master
- [15] recyclage-du-polyethylene-haute-densite-pehd-processus-avantages-et-utilisations/  
Récupéré sur <https://www.france-industrie.pro/>. «En ligne].
- [16] «cnesst,» fiche complète pour isobutane.. [En ligne].
- [17] Meghagha. Ghania, « "Amélioration du taux de récupération de l'isobutane de recyclage au niveau de la colonne de purification par simulation HYSYS ".,» Universite de Boumerdes , 2021-2022.memoire Master
- [18] « fr.sirloongas.com,» [En ligne].
- [19] «Manuel operatoire,» INTEDRA , skikda, 2001.