



N° Ordre /Faculté /UMBB/2024
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 :

ABKARI Imene

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Génie des Procédés

Option : Technologie de la Pétrochimie.

Thème

**Calcul de vérification des paramètres de
fonctionnement de la colonne de purification de
l'isobutane.**

Devant le jury :

KADDOUR	Omar	Professeur	UMBB	Encadrant
BEDDOUD	Karim	MCB	UMBB	Président
SAOUD	Abdessalem	MCB	UMBB	Examinateur

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciement :

Je remercie tout d'abord Allah le tout puissant pour m'avoir donné la force, la volonté, la sagesse et la patience pour arriver à ce stade d'études.

Je remercie mes chers « parents » pour leur soutien moral et financier, le courage qu'ils m'ont donné pour surmonter toutes les difficultés durant mes années d'études et de m'avoir aidé à élaborer ce modeste projet.

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon encadrant « **Mr KADDOUR Omar** » professeur à l'université de M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, qui m'a proposé ce sujet de projet si passionnant et intéressant à qui me témoigne mes profondes reconnaissances pour le suivi constant et conseils dont j'ai pu bénéficier au cours de ce travail.*

Je tiens à remercier les membres de jury pour leur présence parmi nous et d'avoir accepté de juger ce travail.

*Je tiens à remercier **Mr SASSANE, Mr ZAAROURI** et tout le personnel du complexe pétrochimique CP2K à Skikda, service de production qui nous ont aidés pendant notre période de stage et à la préparation de ce travail.*

J'adresse aussi mes remerciements à ceux qui m'ont encouragé et participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

-Katia-

Dédicace

Je souhaite dédier ce mémoire à toutes les personnes qui ont rendu cette aventure académique possible et agréable.

À mes parents, pour leur soutien inconditionnel. Maman, merci de m'avoir soulagée quand j'étais stressée et Papa, merci pour tes efforts constants pour m'aider. Votre amour et votre encouragement ont été mes plus grandes forces.

À ma meilleure amie Souad, pour ta présence fidèle et ton amitié sincère. Ton soutien m'a été précieux tout au long de cette période.

À mes amis proches de la faculté, sans qui cette expérience n'aurait pas été la même. Merci pour votre camaraderie, votre aide et les moments de joie que nous avons partagés.

À Sici et Sara, pour votre gentillesse et votre générosité. Merci pour le soutien que vous m'avez apporté le moment où j'en avais le plus besoin.

-Katia-

Résumé

Ce mémoire se concentre sur la purification de l'isobutane dans une colonne de purification, un élément essentiel pour le recyclage et la récupération des gaz dans les procédés pétrochimiques. La récupération de l'isobutane permet de limiter l'utilisation d'isobutane frais, optimisant ainsi l'efficacité économique et environnementale du processus.

Évaluer la pureté de l'isobutane est essentiel car il est réutilisé dans le circuit de production. Pour cela j'ai fait un calcul de vérification des paramètres opératoires de la colonne de purification de l'isobutane. Un paramètre clé à évaluer est la pureté de l'isobutane, car elle doit être suffisamment élevée pour garantir une réutilisation efficace dans le processus.

Les résultats de mes calculs ont été concluants, démontrant que la colonne de purification fonctionne efficacement malgré les variations de débit. De plus, j'ai confirmé ces résultats à l'aide de la simulation HYSYS. Cette vérification est cruciale pour maintenir la qualité et l'efficacité du recyclage de l'isobutane, contribuant ainsi à l'optimisation du processus de production.

Summary

This thesis focuses on the purification of isobutane in a purification column, a crucial element for the recycling and recovery of gases in petrochemical processes. Recovering isobutane helps limit the use of fresh isobutane, thus optimizing the economic and environmental efficiency of the process. Evaluating the purity of isobutane is essential as it is reused in the production circuit. For this, I conducted a verification calculation of the operating parameters of the isobutane purification column. A key parameter to evaluate is the purity of isobutane, as it must be sufficiently high to ensure effective reuse in the process.

The results of my calculations were conclusive, demonstrating that the purification column operates efficiently despite variations in flow rate. Additionally, I confirmed these results using HYSYS simulation. This verification is crucial to maintaining the quality and efficiency of isobutane recycling, thereby contributing to the optimization of the production process.

ملخص

يركز هذا البحث على تنقية الأيزوبوتان في عمود التنقية، وهو عنصر أساسي لاستعادة وإعادة تدوير الغازات في العمليات البتروكيميائية. تساعد استعادة الأيزوبوتان في الحد من استخدام الأيزوبوتان الجديد، مما يساهم في تحسين الكفاءة الاقتصادية والبيئية للعملية. يعتبر تقييم نقاء الأيزوبوتان أمرًا حيويًا لأنه يعاد استخدامه في دائرة الإنتاج. ولهذا قمت بإجراء حساب للتحقق من معايير التشغيل لعمود تنقية الأيزوبوتان. أحد المعايير الرئيسية التي يجب تقييمها هو نقاء الأيزوبوتان، حيث يجب أن يكون كافيًا لضمان إعادة استخدام فعالة في العملية.

كانت نتائج حساباتي حاسمة، مما يدل على أن عمود التنقية يعمل بكفاءة على الرغم من التغيرات في معدل التدفق. بالإضافة إلى هذا التحقق ضروري للحفاظ على جودة وكفاءة إعادة تدوير الأيزوبوتان، مما أكدته هذه النتائج باستخدام محاكاة HYSYS. يساهم في تحسين عملية الإنتاج

Liste des abréviations :

- CP1K** : Complexe Pétrochimique 1 Skikda.
- CP2K** : Complexe Pétrochimique 2 Skikda.
- PEHD** : Polyéthylène Haut Densité.
- PEBD** : Polyéthylène Base Densité.
- L'** : Débit molaire de la charge.
- V'** : Débit molaire d'off-gaz.
- S'** : Débit molaire de produit soutiré.
- R'** : Débit molaire du résidu.
- K_i** : Constante d'équilibre du constituant i.
- T_{b,r}** : La température dans le ballon de reflux.
- X'_{L,i}** : Composition molaire de la charge par apport au constituant i.
- Y'_{v,i}** : Composition molaire d'off-Gaz par apport au constituant i.
- X'_{s,i}** : Composition molaire de produit soutiré par apport au constituant i.
- X'_{R,i}** : Composition molaire du résidu par apport au constituant i.
- P_{b,r}** : La pression dans le ballon de reflux.
- P_S** : Pression au sommet de la colonne.
- ΔP₁** : Pertes de charge dues aux résistances des conduites du condenseur 0.4-0.6 bars.
- P_F** : La Pression au fond de la colonne.
- ΔP₂** : Pertes de charge dues aux résistances des plateaux 0.4- 0.6bars.
- P_A** : Pression de la zone d'alimentation.
- T_F** : Température au fond de la colonne.
- T_{ST}** : Température de soutirage.
- T_S** : Température au sommet de la colonne.
- T_{S, A}** : Température au sommet de l'accumulateur.
- Q_L** : Charge thermique de l'alimentation Kcal/h.
- Q_R** : Charge thermique de résidu Kcal/h.
- Q_S** : Charge thermique de soutirage Kcal/h.
- Q_{C1}** : Charge thermique de condenseur de la tête de la colonne de purification Kcal/h.
- Q_{Rb}** : Charge thermique fournie par le rebouilleur Kcal/h.
- H_L** : Enthalpie de la charge vapeur Kcal/Kmol.

e'_0 :Taux de vaporisation de la charge.

h_R :Enthalpie de résidu en état liquide Kcal/Kmol.

H_R : Enthalpie de la phase vapeur provenant de rebouilleur Kcal/Kmol.

g_x :Débit du reflux Kmol/h.

h_x :Enthalpie de reflux en état liquide Kcal/Kmol.

H_v : Enthalpie de vapeur provenant de sommet de l'accumulateur en état vapeur Kcal/Kmol.

(r_b) :Taux de rebouillage.

m_{gaz}/CP :débit du gaz entrant la colonne de purification .

$m_{\text{tête}}/\text{CF}$:débit sortant de la tête de la chambre de flash .

m_{N_2}/CP :débit de l'azote entrant la colonne de purification .

m_{pol}/CP : débit de polymères entrant la colonne de purification.

Sommaire

Dédicace

Résumé

Summary

ملخص

Liste des abréviations

Sommaire

Liste de figures

Liste de tableaux

Introduction

Chapitre I : Généralités sur l'isobutane 1

Introduction : 1

1.1 Définition : 1

1.2 Différence entre le butane et l'isobutane : 1

1.3 Propriétés de l'isobutane : 2

1.3.1 Propriétés physiques : 2

1.1.1 Propriétés chimiques : 2

1.4 Production de l'isobutane : 2

1.5 Utilisation de l'isobutane : 4

1.6 Dangers et risques : 5

1.7 Hygiène et sécurité : 5

1.8 Mesures de protection : 6

Conclusion : 6

Chapitre II : Généralités sur les polymères..... 7

Introduction : 7

2.1 Les polymères : 7

2.1.1 Caractéristiques des polymères : 7

2.1.2 Classification des polymères : 10

2.1.2.1 Selon l'origine 10

2.1.2.2 Selon la nature chimique 10

2.1.2.3 Selon le comportement thermique : 10

2.1.2.4 Selon leurs usages technologiques..... 11

2.1.3 Les Propriétés Remarquables des Polymères : 12

2.2 La polymérisation : 12

2.2.1 Les types de polymérisation : 13

2.2.2	Techniques de polymérisation :	14
2.3	Le polyéthylène :	16
2.3.1	Historique :	16
2.3.2	Définition :	16
2.3.3	Différents types de polyéthylènes :	17
2.4	LE PEHD :	18
2.4.1	Principales propriétés du PEHD :	19
2.4.2	Domaines d'application du PEHD :	20
Conclusion :		20
Chapitre III : Théorie sur la Rectification.....		21
Introduction :		21
3.1	Théorie sur la rectification :	21
3.2	Les différents types de rectification :	21
3.2.1	Rectification en continu :	21
3.2.2	Rectification en discontinue :	22
3.2.3	Rectification extractive :	22
3.2.4	Rectification azéotropique :	22
3.2.5	Rectification réactive :	22
3.3	Classification de la rectification selon la nature du mélange :	22
3.4	Description d'une installation d'unité de rectification :	23
3.5	La colonne de rectification :	24
3.6	Principe de fonctionnement d'une colonne de rectification :	25
3.7	Classification des colonnes de rectification :	25
3.8	Caractéristiques générales d'une colonne :	31
3.9	Les Différents problèmes d'une colonne de séparation :	31
3.10	Bilan matière de la colonne et de ses zones :	32
3.10.1	Bilan matière de la zone d'épuisement	33
3.10.2	Bilan matière de la zone d'alimentation :	33
3.11	Lois Fondamentales de transfert de matière :	33
3.11.1	Loi de DALTON :	33
3.11.2	Loi de Raoult et d'HENRY :	34
3.12	Choix de la pression dans la colonne :	35
3.13	Régime de température de la colonne :	36
3.14	Calcul du nombre de plateaux par la méthode de GILLILAND :	39

3.15	Bilan thermique de la colonne :.....	39
	Conclusion :.....	41
	Chapitre IV : Présentation du Complexe CP2K	42
	Introduction :	42
4.1	Historique :.....	42
4.2	Implantation :	42
4.3	Présentation de l'usine :.....	43
4.4	Composition de l'unité :.....	45
4.5	Organisation de CP2K :	46
4.6	Grades du PEHD produits au niveau de CP2K :.....	46
4.7	Différents procédés de fabrication du PEHD :.....	47
4.8	Description du procédé Phillips :	48
	Conclusion :.....	60
	Chapitre V : Calcul de vérification des paramètres de fonctionnement de la colonne de purification de l'isobutane.....	61
	Enoncé de la problématique :	61
5.1	La colonne de purification de l'isobutane existante au niveau de CP2K :	61
5.2	Bilan de matière de la colonne de purification de l'isobutane :.....	61
5.3	Pression aux différentes zones de la colonne :.....	65
5.4	Températures aux différentes zones de la colonne :.....	66
5.5	Bilan thermique de la colonne de purification :.....	68
5.6	Calcul de nombre de plateaux :.....	72
	Chapitre VI : Simulation et Interprétation des résultats	74
	Introduction :	74
6.1	Principes de fonctionnement et rôle des simulateurs	74
6.2	Le choix du modèle thermodynamique :.....	75
6.3	Schéma de simulation de la colonne de purification de l'isobutane :.....	77
6.4	Confirmation des résultats par simulation :	77
	Conditions de fonctionnement en cas design :	78
	Interprétation des résultats :.....	79
	Conclusion générale.....	81

Liste de figures

Figure 1.1-1:Structure et représentations de l'isobutane	1
Figure 1.2-1:réaction d'isomérisation du butane.	3
Figure 1.2-2:Hydrogénation de 2-méthylpropène.	3
Figure 1.2-3:Hydrogénation de 2-méthylpropène.	3
Figure 2.1-1:Des polymères linéaires.	7
Figure 2.1-1: polymères ramifiés.....	8
Figure 2.1-2: polymère réticulé.	8
Figure 2.1-3:polymère amorphe.	8
Figure 2.1-4 :polymère cristallin.	8
Figure 2.1-5:les produits plastiques	11
Figure 2.1-6:les caoutchoucs synthétiques	11
Figure 2.1-7:Fibres synthétiques	11
Figure 2.2-1:modèle schématique de la synthèse d'un polymère.....	12
Figure 2.2-2:modèle schématique de la synthèse d'un polymère.....	12
Figure 2.3-1:PE sous forme de granulés.....	16
Figure 0-1:les propriétés physiques et chimiques du PE	16
Figure 0-1:microstructure du PELBD.	17
Figure 0-1:microstructure du PEHD.....	18
Figure 2.4-1::Répartition des thermoplastiques dans le monde.....	18
Figure 3.5-1:Schéma sur les zones d'une colonne a plateaux	24
Figure 3.7-1:Schéma d'une section d'une colonne a plateaux	26
Figure 3.7-2:Types des plateaux	28
Figure 3.7-3:Schéma d'une colonne a garnissage	29
Figure 3.7-4::types des garnissages	30
Figure 4.2-1:Implantation du complexe CP2K.....	43
Figure 4.3-1:Schéma représente les destinations du produit PEHD	44
Figure 4.4-1:Plan de masse du complexe	45
Figure 4.5-1:Schéma de l'organisation d'unité CP2K.....	46
Figure 4.6-1:Grades du PEHD produits à CP2K	47
Figure 4.8-1:Schéma du procédé Phillips pour la production de PEHD	49
Figure 4.8-2:Traitement de l'Ethylène dans la série des traiteurs	51
Figure 4.8-3:Traitement de l'Hexène	52
Figure 4.8-4:Schéma représentant le traitement de l'isobutane frais.	52
Figure 4.8-5:Schéma représentant le système de traitement de l'isobutane recyclé	53
Figure 4.8-6:Traitement de l'hydrogène.....	53
Figure 4.8-7::Le réacteur utilisé à CP2K.....	54
Figure 4.8-8:Schéma montrant le réacteur du procédé.....	55
Figure 4.8-9:Schéma montrant les pattes de décantation	56
Figure 4.8-10:Système de récupération du polymère	57
Figure 4.8-11: silo du PEHD	57
Figure 4.8-12:stockage du produit fini	58
Figure 4.8-13:schéma présentant le système de colonne d'isobutane de recyclage	59

Liste de tableaux

Tableau 2.1-1:Types des homopolymères.....	9
Tableau 2.1-2:Types des Copolymères	9
Tableau 2.1-3:Fibres synthétiques	11
Tableau 4.3-1:Les matières premières utilisées	44
Tableau 5.2-1:Composition du gaz d'alimentation de la colonne de purification venant de CF	62
Tableau 5.2-2:Composition et débit massique de reflux.	62
Tableau 5.2-3:Composition et débit massique et molaire d'off- gaz.....	64
Tableau 5.2-4:Composition et débits massique et molaire du produit soutiré.....	64
Tableau 5.2-6:Bilan de matière de la colonne.....	65
Tableau 5.2-5:Composition et débit massique et molaire du résidu.....	65
Tableau 5.3-1: Pression du ballon de reflux.	66
Tableau 5.4-1: Température au fond de la colonne.....	67
Tableau 5.4-2: Température de soutirage.....	67
Tableau 5.4-3: Température au sommet.....	68
Tableau 5.5-1: Tableau des résultats de calcul.....	70

Introduction

A l'époque, les humains ont utilisé des matériaux naturels tels que le bois, la laine et le caoutchouc pour répondre à leurs besoins. Ces matériaux présentent des propriétés fascinantes, incitant les scientifiques à les exploiter et explorer la possibilité de créer des matériaux similaires, mais avec des caractéristiques contrôlées et optimisées pour des applications spécifiques.

Les scientifiques ont remarqué que ces matériaux sont composés d'unités répétitives, un peu comme une chaîne. Cela a mené à l'hypothèse que l'interaction entre ces unités répétitives pourrait créer de nouveaux matériaux ayant des propriétés inédites ; d'où vient l'idée de créer des polymères synthétiques.

L'apparition de la science des polymères à la fin du 19^{ème} et au début du 20^{ème} siècle a révolutionné notre manière d'interagir avec l'environnement. Grâce aux travaux de pionniers d'Hermann Staudinger, la compréhension des polymères a développé des techniques de synthèse et de modification précises, ouvrant la voie à l'exploration de nouveaux matériaux.

Aujourd'hui, les polymères jouent un rôle crucial dans notre société moderne en raison de leur polyvalence, de leur adaptabilité, de leur durabilité et de leur large éventail d'applications, ce qui en fait des matériaux essentiels pour de nombreuses industries et pour notre vie quotidienne.

Parmi la vaste gamme de polymères, le polyéthylène (PE) se distingue comme l'un des plus importants au monde sur le plan commercial en raison de sa combinaison unique de légèreté, de résistance, de flexibilité et de faible coût. La production annuelle mondiale du polyéthylène haute densité (PEHD) a atteint 28 millions de tonnes en 2006. Avec une consommation de 4 kg par habitant, c'est le troisième matériau plastique le plus répandu au monde après le PVC et le PP. Ainsi, pour satisfaire le marché national, l'Algérie a acquis l'unité PEHD qui se trouve au niveau du CP2K, un complexe pétrochimique de pointe qui joue un rôle vital dans l'économie algérienne afin de réduire ses importations en polyéthylène et essayer d'aller dans le sens de l'exporter.

Dans ce présent travail, une description brève du complexe CP2K sera apportée. Ainsi, nous passerons en revue l'implantation du complexe, ses différentes zones, départements et services et les grades du PEHD produits au niveau de CP2K. Une description du procédé de production du PEHD sera aussi présentée.

Nous essaierons d'apporter des généralités sur les polymères, l'importance de l'isobutane dans l'industrie pétrochimique, ainsi que de fournir des détails sur le processus de rectification et la colonne de rectification.

Nous nous intéresserons au circuit de récupération de l'isobutane de recyclage, plus particulièrement à l'étude de la séparation de l'isobutane de recyclage au niveau de la colonne de purification par un calcul de vérification de ses paramètres de fonctionnement et d'essayer d'y apporter des améliorations.

Chapitre I : Généralités sur l'isobutane

Introduction :

L'isobutane est un hydrocarbure gazeux incolore et inodore, qui appartient à la catégorie des gaz de pétrole liquéfiés (GPL). Il se trouve à l'état pure sous forme gazeuse, mais il est liquéfié sous pression pour faciliter son stockage et son transport. Il joue un rôle crucial dans divers domaines industriels. Sa structure moléculaire unique le rend précieux pour une multitude d'applications, allant de la production de carburants de haute qualité à la fabrication de produits chimiques essentiels. Comprendre les sources de l'isobutane est essentiel pour évaluer sa disponibilité, son impact environnemental et son potentiel futur. Ce chapitre parle de l'isobutane, en explorant ses origines et les procédés par lesquels il est obtenu.

1.1 Définition :

L'isobutane, également connu sous le nom de 2-méthylpropane, est un hydrocarbure de la famille des alcanes avec la formule chimique C_4H_{10} . Il se distingue par sa structure ramifiée, contrairement à son isomère le butane linéaire, ce qui lui confère des propriétés physico-chimiques uniques.

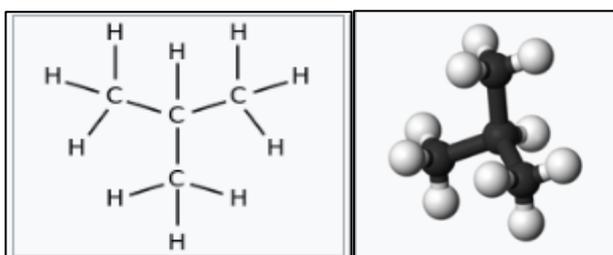


Figure 1.1-1: Structure et représentations de l'isobutane

L'isobutane, également connu sous le nom de 2-méthylpropane, possède plusieurs autres appellations dans la littérature chimique et industrielle :

- 2-Méthylpropane (nom systématique selon la nomenclature de l'IUPAC).
- Méthylpropane.
- Triméthylméthane (moins courant).

1.2 Différence entre le butane et l'isobutane :

L'isobutane et le butane sont deux types de gaz très similaires. Ils ont en commun le fait d'être inodores et incolores. En revanche, ils n'ont pas la même densité ni le même point d'ébullition. Ce dernier est ainsi fixé à $-1^{\circ}C$ pour le butane et $-11,7^{\circ}C$ pour l'isobutane.

1.3 Propriétés de l'isobutane :

1.3.1 Propriétés physiques :

- **État** : Gaz incolore à température et pression ambiantes.
- **Point d'ébullition** : -11,7 °C.
- **Point de fusion** : -159,4 °C.
- **Densité (liquide)** : 0,59 g/cm³ (à 20 °C).
- **Pression de vapeur saturante** : 1,38 MPa (à 20 °C).
- **Limite inférieure d'explosivité (LIE)** : 1,8 % en volume dans l'air.
- **Solubilité** : Légèrement soluble dans l'eau (48,9 mg/L à 25 °C), Soluble dans les solvants organiques courants (benzène, acétone, éthanol, éther).
- **Viscosité** : 0,42 mPa·s (à 20 °C).
- **Indice de réfraction** : 1,351 (à 20 °C).
- **Conductivité thermique** : 0,175 W/(m·K) (à 25 °C).

1.1.1 Propriétés chimiques :

- **Formule chimique** : C₄H₁₀
- **Masse molaire** : 58,12 g/mol.
- **Liaisons** : Liaisons covalentes simples entre les atomes de carbone et d'hydrogène.
- **Réactivité** : Relatif stable à température ambiante, mais devient plus réactif à des températures élevées.
- **Inflammabilité** : Inflammable et peut former des mélanges explosifs avec l'air.
- **Combustion** : Produit du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau lors de sa combustion complète.
- **Réactions** : Peut subir des réactions de substitution, d'addition et de combustion.

1.4 Production de l'isobutane :

L'isobutane provient de :

- **Gaz naturel liquéfié GNL** :

L'isobutane est un composant naturel des LGN extraits du gaz naturel. Il est séparé des autres LGN par des procédés de fractionnement.

- **Pétrole brut** :

Le pétrole brut est chauffé dans une tour de fractionnement atmosphérique. À différentes températures, différents composés se vaporisent. Les composés plus légers, y compris la fraction de gaz de pétrole liquéfié (GPL), qui contient le propane, le butane et l'isobutane, est récupérée en haut de la tour de fractionnement. Le GPL est ensuite traité dans une unité de fractionnement supplémentaire pour séparer spécifiquement l'isobutane des autres composés. Une fois séparé, l'isobutane peut subir des étapes de purification supplémentaires pour éliminer les impuretés et obtenir un produit final de haute qualité.

L'isobutane peut aussi être produit comme sous-produit de divers procédés de raffinage, tels que : reformage catalytique, alkylation, craquage catalytique.

- **Isomérisation :**

L'isomérisation catalytique du butane normal (n-C₄) en isobutane (i-C₄) est un processus important dans l'industrie de raffinage et de la pétrochimie.

Dans cette réaction, une molécule de n-butane (n-C₄H₁₀) est transformée en une molécule d'isobutane (i-C₄H₁₀) en réarrangeant les atomes de carbone de manière à former une structure ramifiée plutôt qu'une chaîne linéaire. L'isomérisation se fait généralement en présence d'un catalyseur acide, les catalyseurs courants comprennent le chlorure d'aluminium et l'acide sulfurique (H₂SO₄). La réaction d'isomérisation se déroule généralement à des températures modérées (généralement entre 150 et 300°C) et à des pressions modérées (autour de la pression atmosphérique). Après la réaction, les produits sont généralement séparés par distillation pour récupérer l'isobutane pur

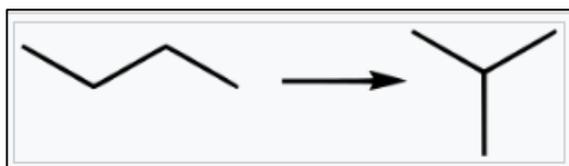


Figure 1.4-1: réaction d'isomérisation du butane.

- **Hydrogénation du l'isobutène :**

Lors d'une réaction d'hydrogénation, une molécule d'hydrogène gazeux est combinée avec une molécule d'alcène. Le produit de la réaction d'addition est alors un hydrocarbure saturé. L'hydrogénation du 2-méthylpropène, aussi connu sous le nom d'isobutène, est une réaction chimique qui ajoute une molécule d'hydrogène (H₂) à la double liaison C=C du composé, le transformant en isobutane.

La réaction nécessite généralement un catalyseur métallique, tel que le platine, le palladium ou le nickel, et des conditions de pression et de température modérées. La température exacte dépend du catalyseur utilisé, mais elle se situe généralement entre 20 et 100 °C. La pression peut être atmosphérique ou légèrement élevée.

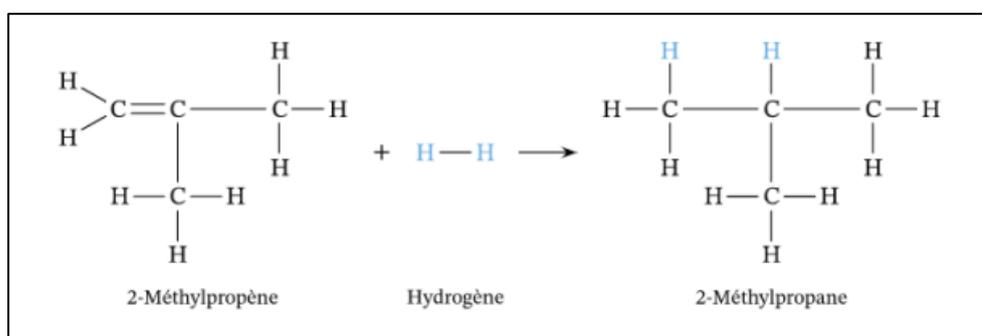


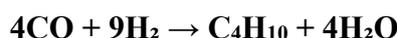
Figure 1.4-2: Hydrogénation de 2-méthylpropène.

- **Synthèse directe d'isobutane à partir de gaz de synthèse ou de CO₂ :**

La conversion des gaz de synthèse en produits chimiques et en combustibles liquides de grande valeur a suscité un grand intérêt. Le procédé Fischer-Tropsch (FT) est une réaction catalytique thermochimique qui convertit un mélange de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H₂) en une variété d'hydrocarbures, dont l'isobutane (C₄H₁₀). Il porte le nom de ses développeurs, les chimistes allemands Hans Fischer et Franz Tropsch, qui ont démontré le procédé pour la première fois en 1925.

Le catalyseur hybride composé d'un catalyseur à base de Cu et d'une zéolite modifiée convertit efficacement le gaz de synthèse en paraffine riche en GPL dans des conditions de fonctionnement douces (260°C, 2.0MPa). De plus, il est intéressant de noter qu'isobutane pouvait également être obtenu avec une sélectivité élevée à partir de gaz de synthèse ou de CO₂ sur ces catalyseurs hybrides

La réaction globale simplifiée du procédé FT peut être représentée par :



1.5 Utilisation de l'isobutane :

- **Dans le procédé Phillips :**

Pour la fabrication de polyéthylène haute densité, l'isobutane est utilisé comme diluant. Lorsque le polyéthylène en suspension est éliminé, l'isobutane est "évaporé", et condensé, et recyclé de nouveau dans le réacteur en boucle à cet effet.

- **Dans Le procédé d'alkylation :**

L'isobutane est une charge d'alimentation clé pour l'alkylation, pour la production des produits à indice d'octane élevé.

- **Dérivés de l'isobutane :**

L'isobutane peut être converti en divers dérivés précieux :

- Alcool isobutylique qui est utilisé comme solvant, anti-mousse et intermédiaire dans la production des produits chimiques.
- Acétate d'isobutyle , un solvant utilisé dans les peintures, les revêtements et les parfums.
- Hydroperoxyde de tert-butyle, un agent oxydant utilisé dans divers processus industriels.

- **Réfrigérant :**

L'isobutane est un réfrigérant écologique utilisé dans certains systèmes de réfrigération en raison de son faible potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP) et de son faible potentiel de réchauffement climatique (GWP). Il est utilisé comme fluide frigorigène et un agent propulseur.

- **Solvant :**

Pour l'extraction et la purification des produits suivants : huiles végétales, gommes, cires, parfums, alcaloïdes, antibiotiques, hormones, vitamines, les produits de nettoyage, produits dégraissants et liquides de freins et aussi comme un solvant pour l'enduction de textiles.

- **Composant de mélange pour carburants :**

L'isobutane peut être mélangé au gaz de pétrole liquéfié (GPL), un combustible polyvalent utilisé pour la cuisson, le chauffage et le transport. Il peut également être ajouté à l'essence en petites quantités pour améliorer son indice d'octane et ses propriétés de combustion.

1.6 Dangers et risques :

Son caractère inflammable nécessite une gestion particulière des risques, et des méthodes d'intervention appropriées : pas de flamme, pas de chalumeau, interdiction de fumer dans un atelier d'intervention, qui doit être ventilé et équipé de dispositifs d'extraction basse.

Pour toute intervention sur une unité hermétique, on préférera l'emploi de techniques sans brasures, mais ces dernières restent possibles sous conditions.

1.7 Hygiène et sécurité :

À température et pression normales l'isobutane est un gaz incolore. À haute concentration, il présente une odeur caractéristique de gaz naturel ou de pétrole. Un agent odorant peut-être ajouté à la qualité commerciale.

L'exposition à l'isobutane en milieu de travail se fait principalement lorsqu'il se trouve à l'état gazeux. L'isobutane peut se trouver également à l'état de gaz liquéfié. Il génère alors une concentration importante d'isopropane en raison de son point d'ébullition très bas et de sa volatilité élevée. Cependant, l'exposition à l'isobutane sous forme de gaz liquéfié est moins présente en raison de son utilisation moins répandue.

- **Exposition au gaz :**

L'isobutane est un dépresseur du système nerveux central lorsque sa concentration atteint 2,4 % (24 000 ppm). À haute concentration il agit comme asphyxiant simple, il peut déplacer l'oxygène nécessaire à la respiration. Il constitue un danger en espace clos. La concentration en isobutane dans un espace clos doit être inférieure ou égale à 10 % de la LIE soit 0,18 % ou 18 000 ppm.

L'isobutane gazeux étant deux fois plus dense que l'air, il aura tendance à s'accumuler dans les endroits confinés en absence de ventilation ou de mouvement d'air, en particulier au niveau du sol. Il pourra se déplacer sur des distances considérables jusqu'à atteindre une source d'inflammation rendant possible un retour de flamme.

- **L'exposition au gaz liquéfié :**

L'isobutane est commercialement disponible à l'état liquide et se retrouve dans certains lieux de travail sous forme de gaz comprimé liquéfié. C'est un liquide à - 11,6 °C, il faut donc tenir compte de tous les aspects que comportent l'exposition à un liquide à basse température.

1.8 Mesures de protection :

La Loi sur la santé et la sécurité du travail vise l'élimination des dangers à la source. Lorsque des mesures d'ingénierie et les modifications des méthodes de travail ne suffisent pas à réduire l'exposition à cette substance, le port d'équipement de protection individuelle peut s'avérer nécessaire. Ces équipements de protection doivent être conformes à la réglementation.

- **Voies respiratoires :** L'isobutane n'est pas une substance réglementée par le RSST, cependant considérant qu'il constitue un isomère du butane dont la VEMP est de 800 ppm, il est donc suggéré de considérer cette valeur quant au port d'un appareil de protection respiratoire approprié. Porter un appareil de protection à approvisionnement d'air si la concentration dans le milieu de travail est susceptible de provoquer l'asphyxie.
- **Peau :** Porter un équipement de protection de la peau s'il y a risque d'éclaboussures avec le gaz liquéfié. La sélection d'un tel équipement dépend de la nature du travail à effectuer.
- **Yeux :** Porter un équipement de protection des yeux s'il y a risque d'éclaboussures avec le gaz liquéfié. La sélection d'un protecteur oculaire dépend de la nature du travail à effectuer et, s'il y a lieu, du type d'appareil de protection respiratoire utilisé.
- **Fuites :** En cas de fuite, fermer la vanne d'arrivée du gaz si on peut y accéder sans risque. Si on ne peut pas arrêter la fuite, amener la bouteille de gaz comprimé dans un endroit isolé à l'abri de toute source d'ignition ou d'inflammation, laisser le gaz s'échapper lentement et ventiler.
- **Déchets :** Laisser échapper le gaz dans l'atmosphère. Fermer la bouteille et la retourner au fournisseur. Pour de grandes quantités, consulter le bureau régional de l'autorité environnementale ayant juridiction.

Conclusion :

Si l'isobutane s'impose de plus en plus comme un gaz indispensable dans notre consommation quotidienne, c'est parce que, outre ses qualités chimiques, son exploitation a peu d'impact sur l'environnement. C'est prouvé, l'isobutane est un gaz écologique qui ne représente qu'un danger très limité pour la couche d'ozone.

Chapitre II : Généralités sur les polymères

Introduction :

Depuis plusieurs années, les matériaux polymères ont joué un grand rôle dans nombreux secteurs industriels. Parmi ces polymères, le polyéthylène (PE) se distingue par sa polyvalence et sa capacité à répondre à des exigences techniques pointues. Le polyéthylène haut densité (PEHD), en particulier, s'impose comme un matériau de choix dans une variété de domaines, y compris l'emballage, la construction, l'industrie pharmaceutique ...

Ce chapitre parle de ces matériaux polymères, examinant leur structure, leurs propriétés et leur obtention en présentant brièvement les bases théoriques des réactions de polymérisation. En explorant aussi les caractéristiques du polyéthylène et du PEHD.

2.1 Les polymères :

Comme leur nom indique « poly= plusieurs et mères= unités », les polymères sont des macromolécules composées d'unités répétitives appelées monomères, formés lors de la réaction de polymérisation.

Ces matériaux présentent une structure moléculaire flexible et peuvent varier considérablement en termes de propriétés physiques et chimiques en fonction de leur composition, de leur poids moléculaire et de leur structure.

2.1.1 Caractéristiques des polymères :

2.1.1.1 Structure du polymère :

Les polymères peuvent présenter des architectures extrêmement variables. Ils peuvent être linéaires, ramifiés ou réticulés. Le plus souvent, ils sont amorphes, parfois ils peuvent être cristallisés.

- **Polymères linéaires :** Les monomères sont liés en une seule chaîne linéaire. Ils sont flexibles et malléables, ce qui les rend parfaits pour être étirés ou façonnés en différentes formes sans se casser.

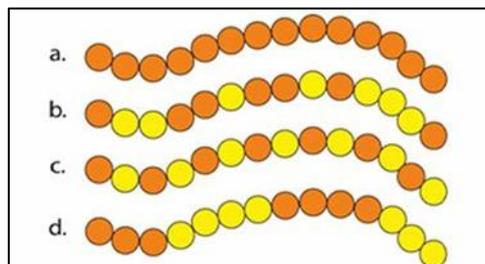


Figure 2.1-1: Des polymères linéaires.

Chapitre II : Généralités sur les polymères

- **Polymères ramifiés** : Les polymères ramifiés présentent des chaînes latérales ou des branches attachées à la chaîne principale. Leurs branches latérales qui leur confèrent une texture plus douce et un comportement moins rigide.

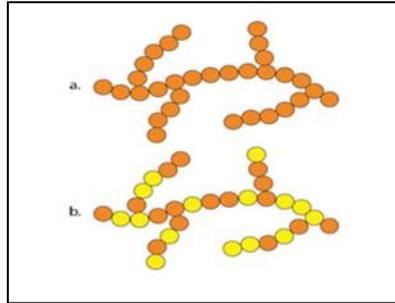


Figure 2.1-1: polymères ramifiés.

- **Polymères réticulés** : Les polymères réticulés ont des liaisons croisées entre les chaînes polymères, formant une structure tridimensionnelle solide. Ils sont idéaux pour les applications nécessitant une grande résistance mécanique et une faible déformation.

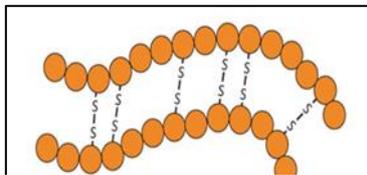


Figure 2.1-2: polymère réticulé.

- **Polymères amorphes** : Dans ces polymères, les chaînes polymères sont disposées de manière aléatoire. Ils ont tendance à être souples, flexibles et transparents ou translucides. Ex : polystyrène (PS).

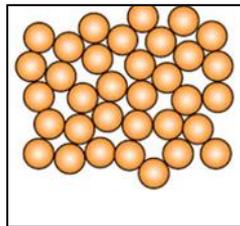


Figure 2.1-3: polymère amorphe.

- **Polymères cristallins** : Les polymères cristallins ont une structure moléculaire régulière et ordonnée. Cette organisation régulière confère une plus grande rigidité, une résistance mécanique accrue et une stabilité dimensionnelle. Les polymères cristallins ont souvent des températures de fusion (T_m) plus élevées que les polymères amorphes.

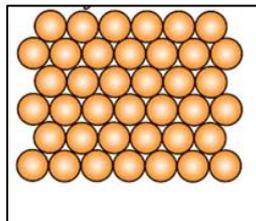


Figure 2.1-4 : polymère cristallin.

Chapitre II : Généralités sur les polymères

2.1.1.2 Types des polymères :

On considère A et B deux monomères différents :

- **Les homopolymères :** Les homopolymères sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité. Il existe, au sein des homopolymères des différents types :

Type	Enchainement	Structure
Les homopolymères linéaires	L'enchainement des monomères s'effectue suivant une seule direction	A-A-A-A
Les homopolymères branches	la chaîne principale présente des ramifications ou des branches constituées des mêmes segments que la chaîne principale	$ \begin{array}{c} A \\ \\ A \\ \\ A-A-A-A \\ \\ A \\ \\ A \end{array} $
Les homopolymères étoilés	Ils possèdent une structure ramifiée en étoile avec une chaîne centrale à laquelle sont rattachées plusieurs chaînes latérales avec même type de monomère.	$ \begin{array}{c} A \quad A \\ \diagdown \quad / \\ A-A-A \\ / \quad \diagdown \\ A \quad A \end{array} $

Tableau 2.1-1:Types des homopolymères

- **Les copolymères :** Ils sont constitués de plusieurs types de monomères. Il existe plusieurs types de copolymères :

Type	Enchainement	Structure
Copolymère alterné	Les deux monomères alternent sur la chaîne.	A-B-A-B-A-B-A-B
Copolymère statistique	Les deux monomères sont repartis aléatoirement	A-A-B-A-B-B-B-A
Copolymère séquencé	Peut être considéré comme deux homopolymères réunis par leurs extrémités.	A-A-A-A-B-B-B-B
Copolymère griffé	Lorsque des chaînes latérales (greffons) se ramifient de la chaîne principale	$ \begin{array}{c} B \\ \\ B \\ \\ B \\ \\ A-A-A-A-A-A \\ \\ B \\ \\ B \\ \\ B \end{array} $
Copolymères en Etoile	Ils possèdent une structure ramifiée en étoile avec une chaîne centrale à laquelle sont rattachées plusieurs chaînes latérales avec des différents types de monomère.	$ \begin{array}{c} B \quad B \\ \diagdown \quad / \\ B-A-B \\ / \quad \diagdown \\ B \quad B \end{array} $

Tableau 2.1-2:Types des Copolymères

2.1.2 Classification des polymères :

2.1.2.1 Selon l'origine :

- **Des polymères naturels** : sont issus des règnes végétaux ou animal. Parmi ces polymères on peut citer les polymères biologiques dont la cellulose est formée de motifs glucoses et les protéines qui sont des polyamides formés de motifs d'acides aminés.
- **Les polymères artificiels** : sont obtenus par modification chimique de polymères naturels de façon à transformer certaines de leurs propriétés comme les esters celluloses (nitrocellulose, acétate de cellulose...)
- **Des polymères synthétiques** : les matières plastiques, les élastomères, les fibres, les adhésifs. Sont totalement issus du génie de l'homme, obtenu par polyaddition ou polycondensation des monomères.

2.1.2.2 Selon la nature chimique :

On distingue :

- **Polymères minéraux** : Formés de chaînes contenant un seul élément (carbone pour le diamant par exemple) ou plusieurs éléments différents (silicates), ils présentent des structures et des propriétés distinctes des polymères organiques.
- **Polymères organiques** : qui constituent la majorité des matériaux polymères utilisés dans la vie courante. Ces polymères synthétiques comprennent des familles comme les polyvinyles, les polyesters, les polyacryliques et les polydiènes.
- **Polymères mixtes** : sont doués de propriétés intéressantes combinent des caractéristiques des polymères organiques et minéraux, offrant des propriétés intéressantes, notamment une résistance thermique élevée pouvant atteindre 300 à 350°C.

2.1.2.3 Selon le comportement thermique :

Les polymères sont souvent classés d'après leurs propriétés thermodynamiques en trois types

- **Les thermoplastiques** : Les thermoplastiques ramollissent sous l'effet de la chaleur. Ils deviennent souples, malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit. Comme cette transformation est réversible, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables.
- **Les thermodurcissables** : Les thermodurcissables sont des plastiques qui prennent une forme définitive au premier refroidissement. La réversibilité de forme est impossible car ils ne se ramollissent plus une fois moulés. Sous de trop fortes températures, ils se dégradent et brûlent (carbonisation).
- **Les élastomères (Thermoélastiques)** : l'objectif des recherches actuellement est la mise au point de polymères capables de conserver l'élasticité à des températures modérément élevées, afin de palier à la limitation thermique qui est un point faible des élastiques actuels. Ils sont employés dans la fabrication des coussins, de certains isolants, dessemelles de chaussures ou des pneus.

2.1.2.4 Selon leurs usages technologiques :

On peut distinguer :

- **Plastiques** : Les plastiques sont relativement des substances avec un haut poids moléculaire qui peuvent être moulées avec (ou sans) l'application de la chaleur. En général, les plastiques sont sous-classifiés en thermoplastiques et thermodurcissables. Les thermoplastiques ont une cristallinité modérée. Ils peuvent subir une large élongation, mais celle-ci n'est pas aussi réversible que pour les élastomères comme le polyéthylène. Les plastiques thermodurcissables sont généralement rigides, tel que les polyuréthanes.



Figure 2.1-5:les produits plastiques

- **Caoutchouc synthétique** :

Les caoutchoucs synthétiques (élastomères) sont des polymères ayant un grand poids moléculaire avec de longues chaînes flexibles et des forces intermoléculaires faibles. Ils ont une faible cristallinité. Les élastomères sont généralement réticulés pour communiquer l'énergie.



Figure 2.1-6:les caoutchoucs synthétiques

- **Fibres synthétiques** :

Les fibres synthétiques sont des polymères à longues chaînes caractérisées par des régions hautement cristallines. Ils ont une élasticité beaucoup plus faible que les plastiques et les élastomères. Ils ont aussi une grande résistance à la traction, un faible poids et une faible absorption de l'humidité.



Figure 2.1-7:Fibres synthétiques

2.1.3 Les Propriétés Remarquables des Polymères :

L'une des principales forces des polymères réside dans leur incroyable diversité. En fonction de la structure chimique et de l'arrangement des monomères, les polymères peuvent présenter un large éventail de propriétés :

- **Propriétés mécaniques** : Les polymères peuvent présenter une résistance et une rigidité remarquables, comme le nylon, ou une flexibilité et une élasticité exceptionnelles, comme le caoutchouc. Leur légèreté les rend idéaux pour les applications dans les domaines du transport et de la construction.
- **Propriétés thermiques** : Certains polymères peuvent supporter des températures extrêmes, tandis que d'autres sont conçus pour être thermoplastiques, ramollissant et fondant à la chaleur, ou thermodurcissables, durcissant de manière irréversible en matériaux rigides.
- **Propriétés chimiques** : Les polymères peuvent présenter une résistance remarquable à la corrosion et aux produits chimiques agressifs, tandis que d'autres sont conçus pour se biodégrader, minimisant ainsi leur impact environnemental.
- **Propriétés électriques** : Certains polymères agissent comme d'excellents isolants électriques, tandis que d'autres possèdent des propriétés semi-conductrices, permettant le développement de dispositifs électroniques.

2.2 La polymérisation :

La polymérisation désigne la réaction chimique, ou le procédé, permettant la synthèse de polymères à partir de molécules réactives appelés monomères.

En général, en présence de réactifs et sous l'action de la chaleur et de la pression, il se forme des chaînes macromoléculaires constituées de motifs de répétition identiques ou différents, liés de façon généralement covalente. On obtient des polymères de masses molaires éventuellement élevées. Chaque polymère possède des propriétés uniques qui déterminent son utilisation spécifique.

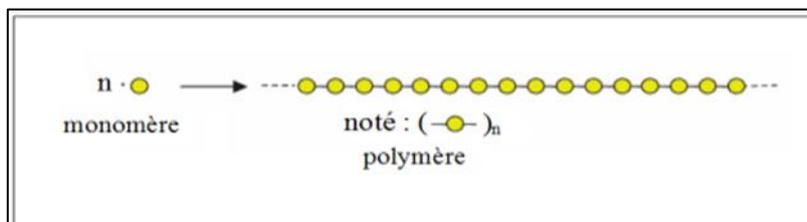


Figure 2.2-1 : modèle schématique de la synthèse d'un polymère.

La lettre n est appelée « degré de polymérisation », c'est le nombre total de monomères contenus dans une macromolécule. Il définit la longueur d'une chaîne polymère. Lorsqu'il est inférieur à 30, on parle d'oligomère et lorsqu'il est supérieur à 30, c'est un polymère.

2.2.1 Les types de polymérisation :

Les réactions chimiques utilisables pour synthétiser des polymères se regroupent en deux familles :

2.2.1.1 Polymérisation en chaîne :

Une réaction de polymérisation en chaîne est une réaction au cours de laquelle une molécule de monomère est additionnée à une autre, ensuite une troisième, et ainsi de suite jusqu'à former une macromolécule. Les monomères de ce type de polymérisation sont principalement des composés oléfiniques à faible poids moléculaire comme l'éthylène. Ce processus ne produit pas d'autres sous-produits. Exemple de polymérisation de l'éthylène :



Les initiateurs de la polymérisation d'addition sont les radicaux libres, anions, cations et composés de coordination. Il existe quatre types de polymérisation en chaîne :

- **Polymérisation radicalaire** : Les radicaux libres comme initiateurs peuvent polymériser les composés oléfiniques. Ces composés chimiques ont des liaisons covalentes faibles qui se rompent facilement en deux radicaux libres s'ils sont soumis à la chaleur. Les réactions de transfert de chaîne arrivent souvent et le résultat est un produit fortement ramifié, comme le cas de la polymérisation de l'éthylène utilisant un peroxyde organique comme initiateur.
- **Polymérisation cationique** : Les acides forts protoniques peuvent affecter la Polymérisation des oléfines. Les acides de Lewis, tels AlCl_3 ou BF_3 , peuvent aussi initier la polymérisation. On aura une formation des centres actifs cationiques au niveau de l'initiation. Dans ce cas, une quantité de protons donneurs de l'ordre de traces, comme l'eau ou le méthanol est normalement nécessaire.
- **Polymérisation anionique** : La polymérisation anionique est la mieux indiquée pour les monomères vinyliques avec des groupements attracteurs d'électrons qui stabilisent l'intermédiaire. Les monomères typiques qui polymérisent mieux par des initiateurs anioniques incluent l'acrylonitrile, le styrène et le butadiène. Comme avec la polymérisation cationique, un centre actif anionique est présent avec la chaîne propagée. Les étapes de propagation et de terminaison sont similaires à celle de la polymérisation cationique.
- **Polymérisation par coordination** : Les polymérisations catalysées par des composés de coordination sont en train de devenir de plus en plus importantes pour l'obtention des polymères avec des propriétés spéciales. Dans la polymérisation de coordination, les liaisons sont considérablement covalentes mais avec un certain pourcentage de caractère ionique. Une liaison se crée entre l'ion métallique central et le ligand (oléfine, dioléfine ou monoxyde de carbone) pour former un complexe de coordination. Les catalyseurs généralement utilisés sont soit les catalyseurs « Ziegler-Natta », un mélange de triéthyle d'aluminium et tétrachlorure de titane ou bien « l'oxyde de chrome ».

2.2.1.2 Polymérisation par étapes :

Dans ce type de polymérisation, les macromolécules résultent de réactions successives entre les fonctions antagonistes portées par des molécules plurifonctionnelles (fonctionnalité ≥ 2). La réaction se produit dans les conditions où réagissent habituellement les fonctions organiques concernées, par simple chauffage ou en présence d'un catalyseur convenable.

La polymérisation par condensation produit des polymères importants comme les polyesters, les polyamides (nylons), les polycarbonates, les polyuréthanes et les résines phénol formaldéhyde. Dans ce type de polymérisation, une petite molécule résulte de la réaction de condensation. Elle est soumise soit à :

- Une réaction entre deux monomères différents. Chaque polymère possède au moins deux groupes fonctionnels différents qui peuvent réagir avec les groupes fonctionnels de l'autre monomère. Par exemple, une réaction entre un diacide et un diol peut produire des polyesters :



- Des réactions entre les espèces d'un monomère avec deux groupes fonctionnels différents. Un groupe fonctionnel d'une molécule réagit avec l'autre groupe fonctionnel de la deuxième molécule. Par exemple, la polymérisation d'un acide aminé commence avec la condensation de deux molécules du monomère :



2.2.2 Techniques de polymérisation :

2.2.2.1 Polymérisation en masse :

Dans cette méthode, les monomères sont chauffés sans solvant, sous l'action de la chaleur, de radiations ou d'un amorceur, ce qui entraîne leur polymérisation directe pour former le polymère. Cette technique est couramment utilisée pour les polymères thermoplastiques tels que le polyéthylène et le polystyrène. On obtient des polymères à masse moléculaire moyenne basse avec une haute pureté. L'inconvénient de ce type de procédé qu'on aura un faible taux de conversion comparant aux autres procédés, à cause du mauvais transfert de chaleur et la faible surface de contact.

2.2.2.2 Polymérisation en solution :

Dans ce cas, la polymérisation se fait en présence d'un solvant suivant un système homogène tel que le monomère et le polymère sont soluble dans ce solvant. Ses avantages sont définis par un bon transfert de chaleur et une bonne agitation, donc, on obtient des polymères à haute masse moléculaire moyenne, mais, ils nécessitent une purification.

2.2.2.3 Polymérisation en suspension :

Cette méthode se ressemble à la première. On utilise les tensioactifs pour que les monomères sont dispersés dans un milieu aqueux. La réaction se fait dans le noyau donc c'est une polymérisation micro masse. Les polymères formés restent sous forme de petites particules en suspension dans le milieu réactionnel. Cette méthode est couramment utilisée pour les polymères insolubles dans l'eau ou pour les polymères à structure poreuse. Elle est caractérisée par un bon transfert de chaleur.

- **La phase dispersée :** monomère + amorceur.
- **La phase dispersante :** eau + tensioactif.

2.2.2.4 Polymérisation en émulsion :

Dans la polymérisation en émulsion, les monomères sont émulsionnés dans un milieu aqueux en utilisant un agent émulsifiant. Les monomères forment de petites gouttelettes dispersées dans la phase aqueuse. La polymérisation contient deux phases liquides non miscibles, une phase aqueuse continue et une phase discontinue non aqueuse constituée d'un monomère et d'un polymère. la réaction s'effectue sur la surface superficielle de la micelle. Ses avantages : un bon transfert thermique et des polymères à hautes masse moléculaire moyenne malgré qu'ils soient impurs.

2.3 Le polyéthylène :

2.3.1 Historique :

Dans les années 1930, des scientifiques étaient curieux des effets de pressions très élevées sur les gaz organiques. L'un des gaz étudiés était l'éthylène. On l'a placé dans un contenant très solide et rigide, puis on l'a soumis à une pression de 1000 atm. En ouvrant le contenant, on a constaté la formation d'un « solide cireux blanc ». Cette expérience assez rudimentaire a conduit à la recherche de moyens de contrôler le processus de polymérisation afin d'obtenir un produit utile.

La seconde grande avancée dans l'histoire du polyéthylène a été le développement des catalyseurs métalliques capables de polymériser l'éthylène dans des conditions plus douces de pression et de température. En 1930, Carl Shipp Marvel, un chimiste américain a découvert un matériau à haute densité, mais il n'a pas reconnu le potentiel du produit. Il revint à Karl Ziegler d'obtenir le crédit pour avoir inventé le HDPE linéaire, que Ziegler a en fait en catalysant la réaction à basse pression avec un composé organométallique. Le processus a ensuite été amélioré par le chimiste italien Giulio Natta, et les composés sont maintenant connus sous le nom de catalyseurs Ziegler-Natta.

2.3.2 Définition :

Le polyéthylène ou polythène (abrégié PE) est le plus important polymère de synthèse, devant le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC) et le polystyrène. Il est généralement un solide incolore ou blanc, translucide et thermoplastique, facilement transportable, très étanche et spécifiquement caractérisé par sa grande résistance à une vaste variété de contaminants chimiques. Il est obtenu par la polymérisation de l'éthylène gazeux issu du craquage thermique des produits pétroliers.

De nombreux types de polyéthylène sont connus, la plupart ayant la formule chimique $(C_2H_4)_n$. Ils sont employés pour la fabrication des sacs plastiques, des bouteilles d'emballage, jouets...

Propriétés chimiques	
Formule	$(C_2H_4)_n$
Propriétés physiques	
T° transition vitreuse	~ -110 °C (transition γ)
T° fusion	85 à 140 °C ¹
Paramètre de solubilité δ	16,2 MPa ^{1/22}
Masse volumique	0,91–0,96 g·cm ⁻³ ¹
T° d'auto-inflammation	330 à 410 °C ¹
Point d'éclair	341 °C ¹



Figure 2.3-1: PE sous forme de granulés

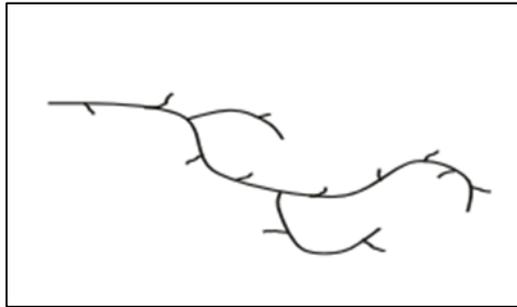
Figure 0-1: les propriétés physiques et chimiques du PE

2.3.3 Différents types de polyéthylènes :

Le polyéthylène est un thermoplastique largement utilisé, il existe plusieurs types en fonction de leur densité et de leur structure moléculaire. Les types les plus courants actuellement sur le marché sont :

2.3.3.1 Polyéthylène basse densité (PEBD) :

Le PEBD ou polyéthylène basse densité synthétisé sous forte pression par polymérisation radicalaire. Contrairement au PEHD, le PEBD présente un nombre élevé de ramifications relativement importantes directement responsables de sa faible masse volumique (de 0.915 et 0.935 g/cm³). Il est souvent utilisé dans la production de films plastiques, de sacs d'emballage, de films rétractables, de bouteilles souples, de jouets et d'autres produits nécessitant une bonne capacité de moulage et une résistance à la perforation.



2.3.3.2 Polyéthylène Linéaire a Basse Densité (PELBD) :

Le PELBD et le PEBD partagent une structure moléculaire similaire. Cependant, ses branches sont nettement plus courtes que celles du PEBD. Cela signifie que les chaînes moléculaires sont moins susceptibles de s'enchevêtrer. Des catalyseurs spécifiques, souvent à base de métaux de transition comme le Ziegler-Natta ou le métallocène. La copolymérisation se déroule généralement à basse pression et température par rapport à d'autres procédés de fabrication du polyéthylène. Le PELBD présente un allongement très élevé et une bonne résistance à la traction. Il est par conséquent fréquemment utilisé dans les films étirables.

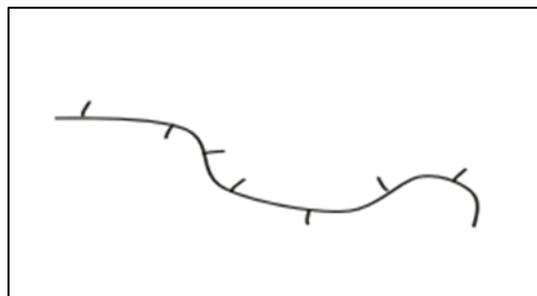


Figure 0-1: microstructure du PELBD.

2.3.3.3 Polyéthylène haute densité (PEHD) :

Le PEHD ou polyéthylène haute densité synthétisé sous faible pression par le procédé Philips ou Ziegler. Il se présente sous la forme d'une chaîne macromoléculaire linéaire régulière. Quelques irrégularités restent présentes et se manifestent sous la forme de courtes ramifications. Sa masse volumique est la plus importante de tous les polyéthylènes et varie entre 0.955 et 0.970 g/cm³.

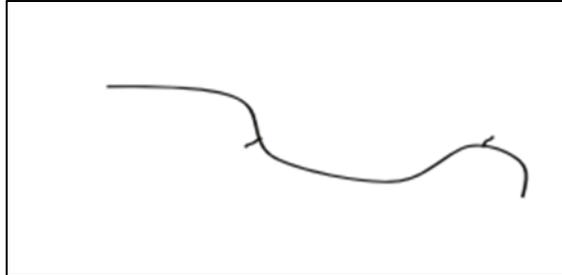


Figure 0-1: microstructure du PEHD.

2.4 LE PEHD :

Le polyéthylène haute densité (PEHD) s'est imposé comme un élément indispensable de notre vie quotidienne. Sa présence est remarquable dans la production mondiale de polymères, car il sert de base à l'industrie de transformation des polymères et des plastiques. Au cours du siècle dernier, il a su se substituer à de nombreux matériaux dans divers domaines et continue à le faire aujourd'hui. Sa demande ne cesse de croître à travers le monde.

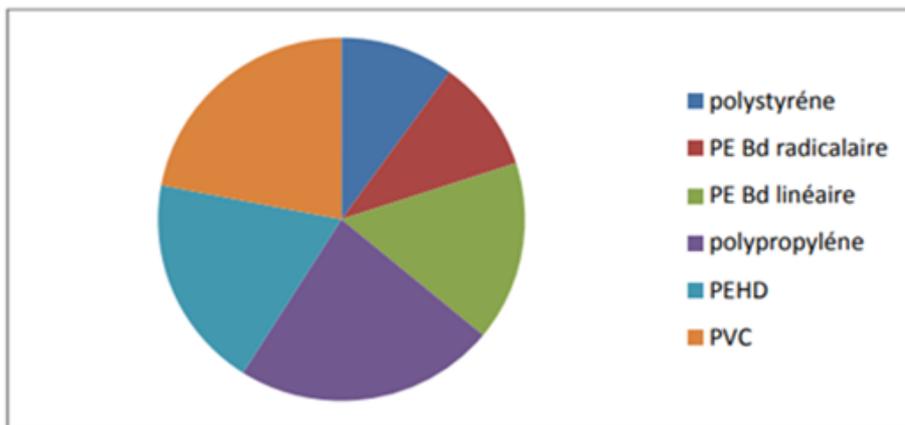


Figure 2.4-1::Répartition des thermoplastiques dans le monde.

2.4.1 Principales propriétés du PEHD :

2.4.1.1 Propriétés mécaniques :

- **Résistance à la traction** : Le PEHD offre une résistance à la traction élevée, ce qui signifie qu'il peut supporter des forces de traction importantes sans se rompre. Cette propriété est essentielle pour des applications telles que les tuyaux, les tubes et les pièces structurelles.
- **Résilience** : Le PEHD est un matériau résilient, ce qui signifie qu'il peut absorber de l'énergie sans se casser. Cette propriété le rend utile pour des applications où le matériau est soumis à des chocs ou des impacts.
- **Dureté** : Le PEHD est un matériau dur et résistant à l'abrasion, ce qui le rend adapté à des applications où le frottement et l'usure sont des facteurs importants.

2.4.1.2 Propriétés physiques :

- **Densité** : Le PEHD présente une densité d'environ 0,94 à 0,96 g/cm³, ce qui le rend plus léger que l'eau et que d'autres polymères comme le polyéthylène basse densité (PEBD). Cette caractéristique le rend intéressant pour des applications où le poids est un facteur crucial.
- **Aspect** : Le PEHD est opaque et présente une surface lisse et brillante. Il peut être coloré dans une large gamme de couleurs pour répondre à des besoins esthétiques spécifiques.
- **Transparence** : Le PEHD n'est pas transparent dans sa forme pure, mais il peut être rendu translucide ou même transparent dans une certaine mesure par un traitement approprié.

2.4.1.3 Propriétés chimiques :

- **Résistance chimique** : Le PEHD est résistant à une large gamme de produits chimiques, y compris les acides, les bases, les solvants et les agents oxydants. Cette propriété le rend idéal pour des applications où le matériau est en contact avec des produits chimiques agressifs.
- **Barrière à l'oxygène et à la vapeur d'eau** : Le PEHD offre une excellente barrière à l'oxygène et à la vapeur d'eau, ce qui le rend utile pour le conditionnement d'aliments et de produits pharmaceutiques, où il est crucial de préserver la fraîcheur et d'empêcher la contamination.

2.4.1.4 Propriétés thermiques :

- **Point de fusion** : Le PEHD a un point de fusion élevé, typiquement entre 125 et 135°C. Cela lui confère une excellente stabilité dimensionnelle et une résistance à la chaleur, permettant son utilisation dans des environnements chauds.
- **Conductivité thermique** : Le PEHD est un bon isolant thermique, ce qui signifie qu'il conduit mal la chaleur. Cette propriété le rend utile pour des applications où la conservation de la chaleur ou du froid est importante, comme dans les tuyaux d'eau chaude ou les isolants thermiques.

2.4.1.5 Propriétés électriques :

Le PE présente d'excellentes propriétés d'isolation électrique quelles que soient sa masse moléculaire et sa cristallinité. Sa faible permittivité relative et son faible facteur de dissipation diélectrique font de lui un matériau de choix en isolation électrique.

2.4.1.6 Propriétés environnementales :

- **Recyclable** : Le PEHD est un matériau recyclable, ce qui signifie qu'il peut être transformé en nouveaux produits à la fin de sa vie utile. Cette propriété contribue à réduire l'impact environnemental du PEHD et à promouvoir une économie circulaire.
- **Biodégradabilité** : Le PEHD n'est pas biodégradable dans des conditions environnementales normales. Cependant, des grades biodégradables de PEHD sont disponibles pour des applications où la dégradation naturelle du matériau est souhaitée.

2.4.2 Domaines d'application du PEHD :

Le PEHD doit répondre à plusieurs utilisations aux usages très variés on donne ici des exemples pour quelques applications :

➤ Films :

- **Emballages industriels** : sacs pour produits chimiques, sacs pour matériaux de construction.
- **Hygiène** : couches pour bébés.
- **Agriculture** : serres, tunnels agricoles.

➤ Injection :

- **Secteur industriel** : pièces pour la manutention, conteneurs pour produits chimiques.
- **Applications techniques** : mobilier urbain, équipements pour l'industrie.

➤ Soufflage :

- Fabrication de bouteilles et de flacons pour les produits ménagers, les produits chimiques, les produits alimentaires, etc.
- Bidons de lait et récipients pour lessive et détergents.

➤ Pipe :

- **Tuyauteries de gaz** : le PEHD est couramment utilisé pour les conduites de distribution de gaz en raison de sa résistance aux produits chimiques et à la corrosion.
- **Tuyaux sous pression** : utilisés pour le transport d'eau potable et d'eau chaude, ainsi que pour le chauffage par le sol.

➤ Construction :

- **Géo membranes** : utilisées comme barrières étanches dans les applications de génie civil et de protection de l'environnement, telles que les revêtements de bassins de rétention, les liners pour les décharges et les réservoirs de stockage.
- **Tubes et conduites** : le PEHD est utilisé dans les systèmes de drainage et d'assainissement, ainsi que pour les canalisations d'eau potable et d'eaux usées.

Conclusion :

Le polyéthylène, par ses propriétés exceptionnelles et sa polyvalence, a trouvé sa place dans de nombreux aspects de notre vie quotidienne. Toutefois, il est essentiel de reconnaître et d'adresser les défis environnementaux qu'il présente. Avec une utilisation responsable, des efforts de recyclage renforcés et des innovations continues, le polyéthylène peut continuer à servir l'humanité tout en respectant notre planète.

Chapitre III : Théorie sur la Rectification

Introduction :

La distillation, connue depuis plus de 2000 ans et mise en pratique depuis environ 500 ans, est la principale opération unitaire utilisée industriellement pour la séparation et la purification des composants d'un mélange liquide, en se basant sur leurs points d'ébullition.

Cependant, la présence fréquente des mélanges à faible volatilité relative dans les effluents industriels pose un défi majeur, car ils ne peuvent être séparés par distillation conventionnelle. Donc, de nombreuses études ont contribué à l'amélioration des procédés de distillation, rendant possible la séparation de mélanges complexes. C'est ici que la rectification intervient comme une solution raffinée, offrant une méthode capable d'obtenir des produits hautement purs en surmontant ces limitations.

Dans ce chapitre, présente la rectification, ses différents types et le fonctionnement des colonnes de rectification.

3.1 Théorie sur la rectification :

La rectification est un procédé physique de séparation, caractérisé par des transferts de matière et de chaleur entre une phase liquide et une phase gazeuse, qui permet de séparer les constituants d'un mélange en se basant sur la différence de volatilité entre ces constituants. C'est une opération qui intervient spécifiquement lorsque les différences de volatilité entre les composants du mélange sont faibles.

Le phénomène physique qui régit la rectification est la diffusion à contre-courant qui s'instaure entre la phase liquide et la phase gazeuse. Grâce à une série d'étapes de vaporisation et de condensation, les composants du mélange sont progressivement isolés, permettant d'atteindre un degré de pureté très élevé pour les composants séparés.

La rectification est une technique qui utilise une distillation répétée dans une colonne, appelée « colonne de rectification ». Les transferts de matière et de chaleur s'établissent au moyen de dispositifs de contact qui engendrent de grandes Surfaces d'échange entre les deux phases.

La rectification joue un rôle essentiel dans de nombreux secteurs industriels, notamment la chimie, la pétrochimie et la pharmacie, en garantissant des produits de haute qualité et pureté qui répondent aux exigences spécifiques des applications finales.

3.2 Les différents types de rectification :

3.2.1 Rectification en continu :

La plupart des colonnes de distillation utilisées dans l'industrie du pétrole et dans les industries chimiques et pétrochimiques fonctionnent en continu, et en régime permanent.

En rectification continue, les colonnes rectifient à la fois les deux produits. Elles sont alimentées en permanence par une charge dont la composition, le débit et la température sont constants. Elles produisent en tête un distillat riche en constituant le plus volatil, et au fond un

résidu riche en composant le moins volatil, dont la composition, le débit et la température sont également constants. Seule la pression varie légèrement entre le sommet et le fond, par suite des pertes de charge dans les étages de contact.

Le procédé continu a un cout d'investissement très important, il est par contre assez sophistiqué ce qui le rend peu adapté à des productions différentes.

3.2.2 Rectification en discontinue :

Cette opération se différencie essentiellement de la rectification en continu par la variation régulière des paramètres locaux au cours du temps : concentrations, températures et quelquefois débits. En rectification discontinue on rectifie que le produit le plus volatil.

Le procédé discontinu est réservé plutôt à de faibles productions, à des productions différentes ou lorsque le nombre de constituants à séparer est important. Il nécessite un investissement car il est plus simple à mettre en œuvre.

3.2.3 Rectification extractive :

La distillation extractive est devenue une méthode de séparation de plus en plus importante dans la technologie pétrochimique.

C'est un procédé qui permet de séparer les constituants d'un mélange ayant des points d'ébullition voisins. Le moyen mis en œuvre est l'introduction dans le système un entraîneur, qui modifie les volatilités relatives des constituants. L'entraîneur est un sel ou un solvant qui a toujours un point d'ébullition élevé et entraîne avec lui un ou plusieurs des constituants du mélange.

3.2.4 Rectification azéotropique :

Le procédé permet de séparer les constituants d'un mélange formant un azéotrope ou présentant une volatilité relative voisine. En introduisant dans le système un entraîneur, on aura une formation d'un azéotrope avec un ou plusieurs des constituants du mélange initial.

3.2.5 Rectification réactive :

La distillation réactive signifie l'intégration des fonctions de distillation et de réaction dans le même appareil. Les buts principaux de la distillation réactive sont l'amélioration du taux de conversion, l'accroissement de la sélectivité et de la productivité d'une réaction. Il s'agit d'une opération unitaire dans laquelle une réaction chimique et une séparation par distillation sont réalisées simultanément dans une colonne de rectification. La réaction a lieu le plus souvent en phase liquide.

3.3 Classification de la rectification selon la nature du mélange :

3.3.1 Cas d'un mélange binaire :

Dans ce type de rectification la charge à rectifier n'est autre qu'un mélange de deux constituants. L'industrie offre rarement l'occasion de séparer un véritable mélange binaire. Cependant l'étude de cette séparation est particulièrement intéressante, car la simplicité des équations mises en jeu permet une analyse précise de ses opérations et de généraliser les lois obtenues à la rectification des mélanges complexes.

3.3.2 Cas d'un mélange ternaire :

L'étude des mélanges ternaires idéaux apporte la transition idéale entre la théorie de la rectification des mélanges binaires et des mélanges complexes. En effet elle permet de savoir si l'on a le droit d'extrapoler de la distillation des binaires ou quelle modification qu'il y' a lieux d'apporter.

3.3.3 Cas d'un mélange complexe :

On appelle « mélange complexe », un mélange contenant un nombre fini de constituant, ce nombre ne dépassant pas la vingtaine. De tels mélanges sont fréquents dans l'industrie du pétrole. La théorie de la rectification des mélanges complexes est basée sur les mêmes relations fondamentales (équation d'équilibre des phases, équations du bilan de matière et du bilan thermique) appliquées pour la rectification des mélanges binaires.

Dans la théorie de rectification des mélanges complexes, on distingue deux classes de fractionnement :

➤ Fractionnement de première classe :

Tous les constituants de la charge à séparer figurent à la fois dans le distillat et dans le résidu.

➤ Fractionnement de deuxième classe :

Une partie des constituants à séparer est intégralement représentée soit dans le distillat soit dans le résidu. C'est ainsi que leurs concentrations dans un produit obtenu ont égales à zéro, en revanche il y a les constituants intermédiaires qui sont repartis dans le distillat et dans le résidu en suivant leurs volatilités. Dans l'industrie le fractionnement de deuxième classe est le plus couramment employé, généralement le mélange complexe à fractionner est constitué d'hydrocarbures légers allant du méthane à l'heptane ou des gaz naturels contenant des légers (90%), ainsi que les hydrocarbures plus lourds et liquéfiables.

3.4 Description d'une installation d'unité de rectification :

Tous les procédés technologiques dans l'industrie moderne qui a pour but la séparation, le fractionnement, la distillation..., utilisent des équipements spécifiques.

Généralement chaque installation de distillation contient les éléments suivants :

- **Colonne de rectification** : La colonne de distillation ou rectification est une tour cylindrique verticale permet la séparation du liquide et de vapeur en contact par un échange de matière et de chaleur afin d'en faciliter l'écoulement global à contre-courant.
- **Le rebouilleur** : C'est un échangeur de chaleur, dont le rôle est d'assurer le reflux vapeur du fond de la colonne.
- **Le condenseur** : C'est également échangeur de chaleur dans lequel la vapeur sortante en tête de colonne peut être refroidie pour être enfin condensée.
- **Ballon de reflux** : C'est un ballon situé au-dessous du condenseur pour accumuler les produits de tête condensée et surtout pour contenir le liquide de reflux
- **Appareillage annexes** : Pour s'assurer de la gestion économique de la colonne ainsi que de son bon fonctionnement, certains sont à adjoindre, à savoir.
- **Echangeurs thermiques** : Ils sont utilisés pour récupérer la chaleur, par exemple, un échangeur préchauffé la charge d'alimentation par le liquide chaud sortant du bas de la colonne afin de valoriser les rejets thermiques.

- **Les pompes** : Elles sont indispensables pour assurer la circulation des liquides au sein de l'installation et pour compenser les pertes de charge dans les différents éléments.
- **Des appareils de mesure et de régulation** : Pour éviter la perturbation des conditions de fonctionnements, certains appareils de contrôle sont à installer ces derniers permettent de suivre en temps réel l'évolution des différents paramètres opératoires (température pressions) par conséquent, ils faciliteront l'intervention si l'incident qui survient risque d'altérer le bon fonctionnement.

3.5 La colonne de rectification :

La colonne est l'un des équipements les plus hauts à l'intérieur d'un complexe industriel d'hydrocarbures, le premier à être distingué et remarqué vu sa forme un peu spéciale, verticale et cylindrique. La colonne est devisée en trois zones (voir schéma ci-joint) :

- **Zone de flash** : La partie de la colonne où s'effectue l'alimentation
- **Zone de rectification** : se situe au-dessus de la zone d'alimentation, permet de rendre plus grande la concentration de l'élément le plus volatile jusqu'à la valeur désirée.
- **Zone d'épuisement** : La partie inférieure, son rôle consiste à récupérer l'élément le plus volatile entraîné par la phase liquide.

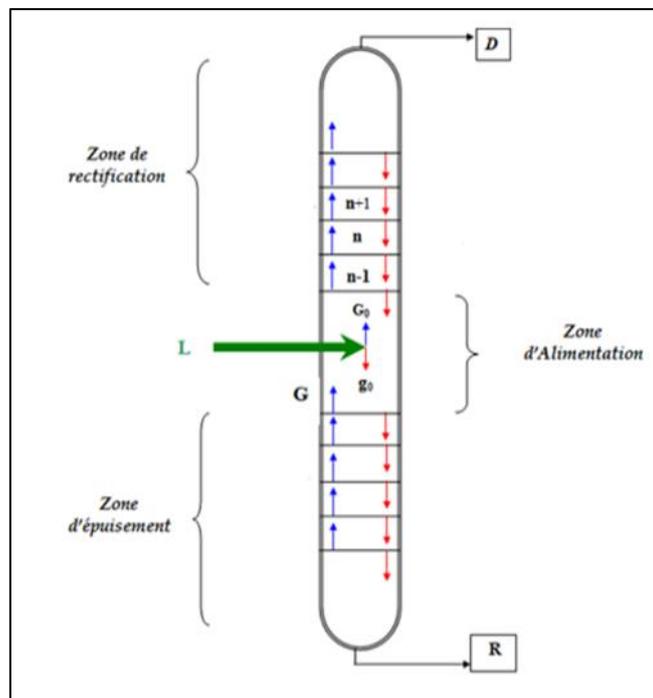


Figure 3.5-1:Schéma sur les zones d'une colonne a plateaux

Comme la distillation est une opération physique de séparation, elle permet de fractionner un mélange complexe en plusieurs produits, ces produits sont répartis selon le besoin en :

- **Distillat (D)** : Récupéré en tête de colonne, le distillat est enrichi en constituants volatils.
- **Produits intermédiaires** : Extraits par soutirages latéraux le long de la colonne, les produits intermédiaires présentent des compositions variables en fonction de leur point de prélèvement.
- **Résidu (R)** : Situé en bas de la colonne, le résidu est principalement composé de constituants lourds.

3.6 Principe de fonctionnement d'une colonne de rectification :

La charge est introduite dans la zone de flash. Elle peut être admise sous forme de liquide, de vapeur ou d'un mélange liquide-vapeur.

La zone d'épuisement est caractérisée par la présence d'un rebouilleur, qui sert à apporter une certaine quantité de chaleur au liquide soutiré du dernier plateau afin de récupérer les constituants légers entraînés par les lourds.

La zone de rectification est caractérisée par un condenseur qui sert à condenser partiellement la vapeur sortante de la tête de colonne. Une partie de ce mélange est envoyée en tant que reflux froid vers la partie supérieure de la colonne pour garder le gradient de température et corriger la composition des produits de tête. L'autre partie est extraite comme distillat à l'état liquide.

Pour assurer le contact intime entre les deux phases sur chaque plateau, des éléments de contact sont placés à l'intérieure d'une virole. Ils sont constitués soit par des plateaux, dont le principe de base est de faire barboter la vapeur dans une rétention liquide provoquée par un barrage coupant la phase liquide, ou par des garnissages, constitués le plus souvent de treillis métallique qui permettent de disperser les phases et d'assurer une bonne surface d'échange entre les fluides circulants à contre-courant.

Sur le long de la colonne les vapeurs s'enrichissent de bas en haut en élément le plus volatil et le liquide s'enrichi en élément le moins volatil de haut en bas. Pour avoir en tête de la colonne un distillat D, de composition YD et en bas ; un résidu R de composition XR.

3.7 Classification des colonnes de rectification :

Elles peuvent être classifiées :

3.7.1 Selon les dispositifs intérieurs assurant le contact liquide-vapeur :

On distingue deux types de colonnes plus courants selon leurs éléments de contact :

➤ Les colonnes à plateaux :

Ces colonnes utilisent des plateaux horizontaux installés à intervalles réguliers le long de la hauteur de la colonne. Le plateau est l'élément actif de la colonne, a pour rôle la mise en contact de deux phases en mouvement, de manière à les rapprocher le plus près possible de l'état d'équilibre. Il comporte :

- Une aire active percée de trous, éventuellement équipés de clapets ou de cloches.
- Un barrage permettant de retenir sur le plateau une certaine épaisseur de liquide.
- Un déversoir permettant d'amener le liquide du plateau considéré vers le plateau inférieur.

Fonctionnement : Le liquide s'accumule dans le plateau, l'excès déborde à travers les déversoirs et descend sur le plateau inférieur, selon un chemin bien tracé. Les vapeurs montantes traversent les orifices du plateau et ensuite par barbotage dans le liquide sortent refroidies dont une partie sera condensée, tout en réchauffant le liquide. Donc on aura transfert de matière et de chaleur entre les deux phases.

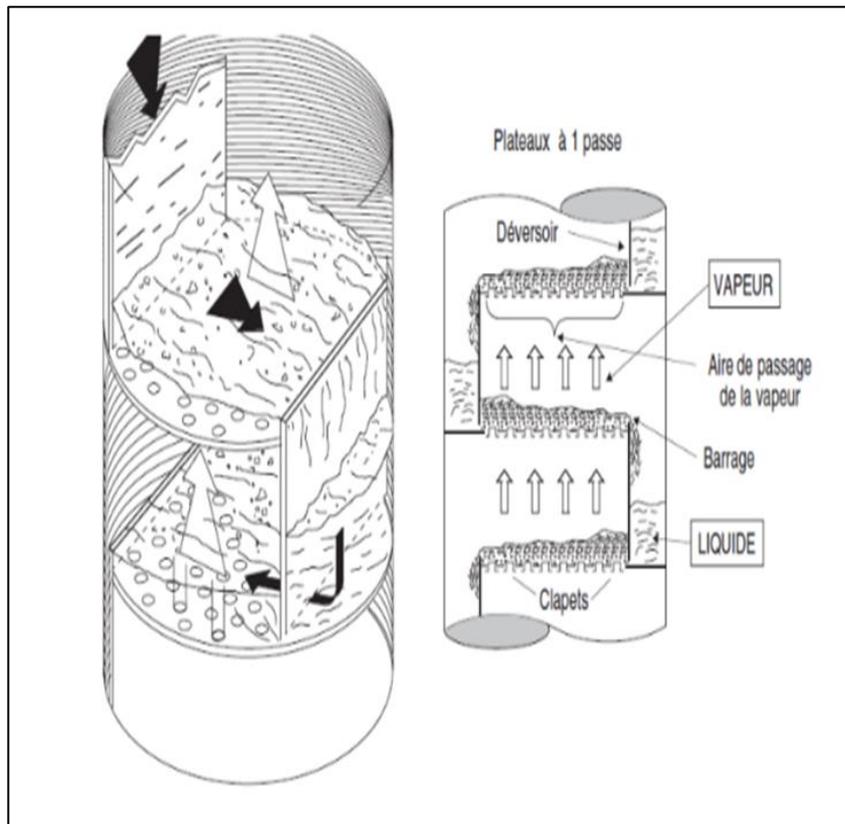


Figure 3.7-1: Schéma d'une section d'une colonne à plateaux

On appelle un plateau théorique le plateau sur lequel est atteint l'équilibre entre le liquide et la Vapeur.

Les colonnes à plateau présentent un certain nombre d'avantages et inconvénients :

- Cout élevé.
- Perte de charge importante à cause de la couche liquide sur le plateau.
- Rétention forte (le liquide reste souvent en fin d'opération sur les plateaux).
- Grand nombre d'étages disponible.

On peut classer les plateaux qui se trouvent dans l'industrie en plusieurs types :

➤ **Selon la nature :**

- **Plateaux à calottes (bubble-cap tray) :**

C'est le modèle le plus répandu encore aujourd'hui dans les industries pétrolières ou chimiques ; construit entièrement en fonte moulée, il s'est maintenant notablement allégé par la construction en acier embouti. Il est constitué d'une plaque perforée, chaque trou étant muni d'une cheminée, celle-ci sert à guider une calotte dont la fixation est assurée par une tige et un contre écrou. Les calottes peuvent être disposées en carré ou en triangle.

Les plateaux à calottes classiques sont les plus anciens et sont de moins en moins utilisés dans l'industrie en raison de leur coût et des fortes pertes de charge qu'il crée dans la colonne.

- **Les plateaux perforés à déversoirs (sieve tray) :**

Plateaux moins performants, car leur utilisation est limitée aux variations très faibles de débit (la vapeur traverse verticalement le liquide, le temps et la surface de contact sont faibles). Ils ont un prix de revient faible et une simplicité de construction et de fonctionnement, Ils sont utilisés que pour des variations de débit très faible autour de la valeur optimale pour laquelle ils ont été calculés.

- **Les plateaux à clapets (valve tray) :**

C'est un plateau dont les orifices sont équipés de clapets, la hauteur de soulèvement de ces derniers est fonction du débit de vapeur, plus le débit des vapeurs est important plus l'ouverture des clapets est importante, et celles-ci sont autoréglables,

Le clapet permet ainsi de maintenir la vitesse à sa valeur optimale, Il a une meilleure efficacité et moyen à élever la capacité, mais il est plus cher car le frais d'entretien est élevé

Il existe une grande variété de forme de clapets : ronds, triangulaires allongés.

- **Plateau « Uniflux » :**

C'est une variante du plateau à calottes. Le plateau est décomposé en bandes ayant une section en S et l'échappement de la vapeur aux échancrures s'effectue uni directionnellement vers le déversoir aval, ce qui tend à favoriser l'écoulement liquide sur le plateau. Par contre, la dispersion de la vapeur dans le liquide est moins homogène que pour les types précédents.

- **Les plateaux à jet directionnels (jet tray):**

Dans le plateau sont découpées des languettes leur inclinaison est dans le sens de l'écoulement du liquide, sur le plateau, l'échappement orienté de la vapeur sous les languettes facilite l'écoulement du liquide, et permet de diminuer le gradient liquide sur le plateau, la perte de charge est moins importante et le prix de revient faible, la construction est très simple.

- **Les plateaux perforés sans déversoirs :**

Ils sont du type perforé, liquide et vapeur circulent à contre-courant par les mêmes orifices de sorte que l'ensemble peut être traité comme une colonne à garnissage, ils ont une bonne efficacité et un prix de revient peut élever. Ils sont réservés aux systèmes pouvant donner lieu à des encrassements ou des dépôts solides.

Tous ces plateaux qui sont construits en acier au carbone, soit an acier allié selon l'agressivité des produits, doivent être démontables, donc les plaques sont décomposées en éléments pouvant être introduit par un trou d'homme.

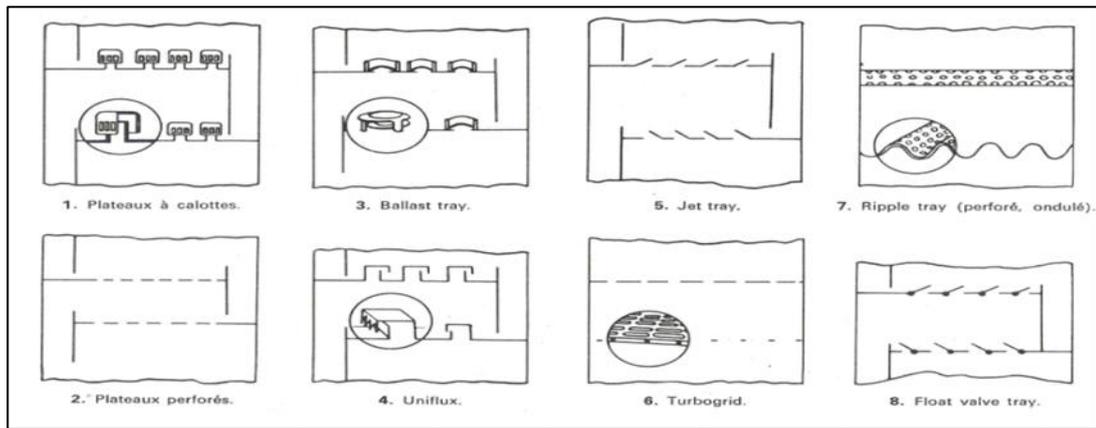


Figure 3.7-2: Types des plateaux

Le choix entre les plateaux est en fonction :

- Des conditions opératoires.
- Des performances demandées.
- Des facteurs économiques.

Généralement pour :

Le transfert de matière entre liquide-vapeur, on utilise :

- Plateau à calottes.
- Plateau à trous.
- Plateau à clapet.
- Plateau à jets.

Le transfert de matière entre liquide- liquide, on utilise :

- Plateau à calottes.
- Plateau à jets.

Le transfert de chaleur, on utilise :

- Plateau à calottes.
- Plateau à clapet.

➤ Selon l'écoulement des phases :

- **Plateau à courant croisé :**

La phase gazeuse ascendante traverse une couche de liquide qui se déplaçant horizontalement avant de déboucher par le trop-plein sur le plateau inférieur.

- **Plateau à contre-courant :**

Dans ce type de plateau, constitué exclusivement par des trous ou des fentes et/ou le liquide et la vapeur s'écoulent par ces orifices. Les avantages de ce type de plateau, résident dans leur simplicité, leur résistance à l'encrassement et leur faible coût. Par contre ils ont un manque de souplesse comme inconvénient

➤ Les colonnes à garnissage :

Les garnissages, sont des éléments en vrac ou structuré placés à l'intérieur d'une colonne. Les garnissages peuvent être de diverses formes, telles que des anneaux, des sphères ou des plaques, et sont disposés de manière à créer des canaux à travers lesquels le liquide et la vapeur peuvent interagir.

Fonctionnement : Dans les colonnes à garnissage, le liquide est pulvérisé sur le garnissage disposé entre des grillages. La phase liquide forme un film à la surface des éléments de garnissage (zone de mouillage).

Ce garnissage, qui crée une série d'obstacles à l'écoulement du liquide et du gaz à l'intérieur de la colonne, permet d'atteindre trois objectifs principaux :

- Augmenter la surface de contact entre les deux phases.
- Augmenter le temps de séjour des deux phases dans la colonne et donc leur durée de contact.
- Créer un régime turbulent de la phase gaz.

Les colonnes à garnissages présentent un certain nombre d'avantage et d'inconvénients :

- Cout moindre
- Perte de charge plus faible
- Rétention plus faible
- Plus petit nombre d'étages qu'une colonne à plateaux pour une même hauteur

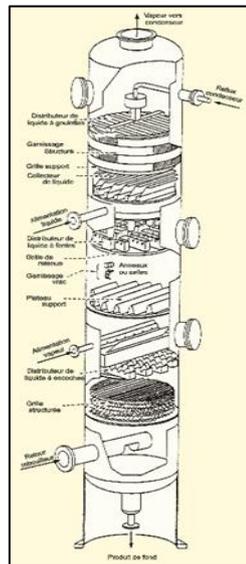


Figure 3.7-3:Schéma d'une colonne a garnissage

On a les types des garnissages suivants :

- **Anneaux de RASHING** : petit manchon cylindrique de hauteur égale au diamètre, en céramique, en acier ou en porcelaine.
- **Anneaux LISSING** : manchon cylindrique avec cloison interne, en céramique.
- **Anneaux PALL** : en acier inoxydable.
- **Selles de BERL ou INTALOX** : de la forme d'une selle de cheval, en céramique.

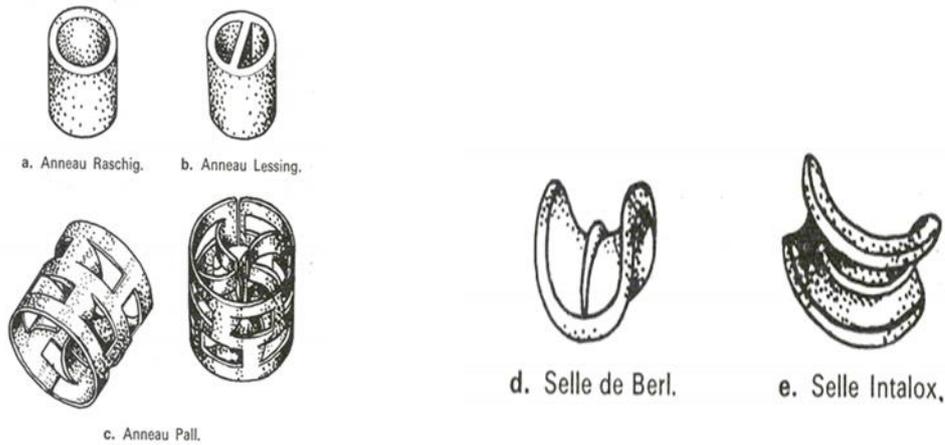


Figure 3.7-4::types des garnissages

3.7.2 Selon la pression du service :

- **Colonnes de rectification atmosphériques :** Ces colonnes fonctionnent à pression atmosphérique, ce qui signifie qu'elles opèrent à environ 1 bar (ou 101,3 kPa). Elles sont principalement utilisées pour séparer les différents composants du pétrole brut. Le pétrole brut est chauffé et introduit en haut de la colonne, où il est soumis à une série de plateaux ou de garnissages. Les différents composants du pétrole brut ont des points d'ébullition différents, donc à chaque plateau ou à travers chaque section de garnissage, les composants s'évaporent et se condensent. Les fractions plus légères, comme l'essence, sont collectées en haut de la colonne, tandis que les fractions plus lourdes, comme le fioul lourd, sont collectées en bas.
- **Colonnes de rectification sous vide :** Ces colonnes sont similaires aux colonnes de distillation atmosphériques, mais elles fonctionnent sous pression réduite. Cela permet de traiter les fractions plus lourdes du pétrole brut qui ont une température d'ébullition très élevée, telles que le gazole et le bitume, à des températures moins élevées, ce qui réduit les risques de dégradation des produits et permet aussi d'économiser de l'énergie.
- **Colonnes de rectification sous pression :** Elles sont utilisées dans des applications spécifiques où des conditions de pression élevée sont nécessaires pour maintenir les composants à l'état liquide à des températures très élevées. Elles sont souvent utilisées dans l'industrie pétrochimique pour la séparation des hydrocarbures légers.

3.7.3 Selon la destination :

On distingue :

- **Les colonnes de fractionnement du pétrole et des produits pétroliers :**

Ces colonnes sont utilisées pour séparer les différents composants du pétrole brut et des produits pétroliers en fonction de leurs points d'ébullition. Par exemple, elles peuvent séparer le pétrole brut en fractions telles que l'essence, le diesel, le kérosène et le fioul lourd.

➤ Les colonnes de fractionnement de gaz :

Ces colonnes sont spécifiquement conçues pour séparer les différents composants du gaz naturel ou des gaz de pétrole liquéfiés (GPL), tels que le méthane, l'éthane, le propane et le butane, en fonction de leurs points d'ébullition.

➤ Les colonnes des installations de cracking catalytique ou thermique :

Ces colonnes sont utilisées dans les procédés de craquage catalytique ou thermique pour séparer les produits obtenus lors de la décomposition thermique des hydrocarbures plus lourds en hydrocarbures plus légers, tels que l'essence et le diesel.

➤ Les colonnes de stabilisation :

Les colonnes de stabilisation sont utilisées pour stabiliser les produits pétroliers légers, tels que l'essence et le naphta, en éliminant les composés volatils tels que le gaz naturel et les vapeurs légères. Cela permet de produire des produits finis sûrs et stables pour le stockage et l'utilisation.

3.8 Caractéristiques générales d'une colonne :

- a. **Puissance de la colonne** : Le terme puissance de la colonne est défini comme étant le nombre de ses plateaux théoriques, où le liquide à ébullition et la vapeur émise sont en équilibre.
- b. **Débit** : C'est le volume de vapeur passant dans la colonne pendant l'unité de temps, le débit sera en fonction du diamètre de la colonne. On ne peut pas augmenter le débit au-delà d'une certaine valeur sous peine de provoquer l'engorgement de la colonne.
- c. **Rétention** : C'est le volume de liquide par unité de volume de la colonne. Elle constitue un facteur important de la précision avec laquelle les constituants sont successivement séparés du mélange.
- d. **Efficacité** : C'est le rapport entre le nombre de plateaux théoriques et le nombre de plateaux réels, elle dépend du taux de reflux et de la pureté du produit.
- e. **Perte de charge** : C'est la force que doit vaincre la vapeur dans son mouvement ascendant, principalement le liquide de reflux, l'alimentation et les changements de direction liés à la conception de la colonne.
- f. **Reflux** : Le reflux désigne la partie du liquide condensé qui est réintroduite en haut de la colonne. Il joue un rôle primordial dans l'optimisation des performances de séparation de la colonne.

3.9 Les Différents problèmes d'une colonne de séparation :

- **Pleurage(weeping)** : Il y a pleurage lorsque le liquide s'écoule d'un plateau à un autre par les orifices du plateau. Ce phénomène peut avoir lieu si les trous dans le plateau sont trop grands ou si le débit de gaz est trop faible.
- **Engorgement (flooding)** : Une colonne est dite engorgée lorsque le reflux liquide descendant ne peut pas s'écouler vers le rebouilleur, il est donc retenu par la poussée de la vapeur montante.
- **Entraînement** : On peut parler d'entraînement lorsque le liquide est transporté par le gaz d'un plateau à un autre plateau supérieur. Ce phénomène est dû à une vitesse trop élevée du gaz dans la zone de contact des phases.

- **Le moussage (foaming)** : La formation de mousse par l'agitation et la turbulence sur le plateau est désirable, elle augmente la surface interfaciale entre le liquide et la vapeur.
- **Soufflage (blowing)** : Ce phénomène peut se manifester quand le débit de vapeur est très important, ce qui provoque la formation d'une brume au-dessus de la zone de contact résultant un pauvre échange entre les deux phases.
- **Mauvaise distribution du liquide** : Ce phénomène engendre une réduction de la surface de contact entre les phases et une diminution de l'efficacité de la colonne. Il se produit lorsque : les plateaux ne sont pas placés horizontalement, le débit du liquide est trop grand, le débit du gaz est trop faible, il y a un problème mécanique avec le plateau.

3.10 Bilan matière de la colonne et de ses zones :

Les bilans matière pour la colonne entière et pour le constituant « *i* » Quelconque s'écrivent :

$$L = D + R \dots \dots \dots (1)$$

Avec :

- L**: Débit molaire de la charge
- D** : Débit molaire du Distillat.
- R**: Débit molaire du Résidu.

Le bilan matière partiel du constituant « *i* » peut s'écrire en composition massique ou molaire comme suit :

$$L \cdot x'_{Li} = D \cdot y'_{Di} + R \cdot x'_{Ri} \dots \dots \dots (2)$$

La résolution connue de ces équations, en appliquant la loi de LEVIER donne :

$$L / (y'_{Di} - x'_{Ri}) = D / (x'_{Li} - x'_{Ri}) = R / (y'_{Di} - x'_{Li}) \dots \dots \dots (3)$$

L'équation obtenue sert à calculer **R** et **D** si les concentrations de l'élément « *i* » du distillat et du résidu sont connues.

Avec r_f : le taux de reflux.

L'équation qui tient compte de la constante des débits molaires **G, g** dans la zone de rectification de la colonne donne une relation entre la concentration en constituant *i* dans le liquide se trouvant sur le plateau (n-1) et la concentration en ce même constituant dont la vapeur provenant du plateau n et permet de déterminer le nombre d'étages théoriques dans la zone de rectification.

3.10.1 Bilan matière de la zone d'épuisement

$$g' = G' + R \dots \dots \dots (10)$$

g' : débit molaire du liquide traversant un sectionnement.

G' : Débit molaire de vapeur traversant un sectionnement entre deux plateaux de la colonne.

R : Débit molaire du résidu.

Donc : $g' \cdot x'_{(n+1)i} = G' y'_{ni} + R \cdot x'_{Ri} \dots \dots \dots (11)$

En appliquant la loi de Lever, on trouve :

$$g' / (y'_{ni} - x'_{Ri}) = G' / (x'_{(n+1)i} - x'_{Ri}) = R / (y'_{ni} - x'_{(n+1)i}) \dots \dots \dots (12)$$

A partir de cette équation, on trouve :

$$x'_{(n+1)i} = (1/m') \cdot y'_{ni} + [(m'-1)/m'] \cdot x'_{Ri} \dots \dots \dots (13)$$

$$y' = [(r_b+1)/r_b] \cdot x' - (1/r_b) x'_{Ri} \dots \dots \dots (14)$$

On note que :

$$r_b = G'/R \text{ et } m' = g'/G' \dots \dots \dots (15)$$

Avec r_b : le taux de rebouillage .

3.10.2 Bilan matière de la zone d'alimentation :

En se référant sur la figure ci-dessous, on voit qu'il faut mélanger le liquide g_k avec la phase g_o pour obtenir le liquide g_m alimentant la zone d'épuisement, le bilan matière sera effectué juste au-dessus du plateau supérieur de cette zone.

$$g_m = g_k + g_o = G_k + R \dots \dots \dots (16)$$

$$g_m x'_{mi} = g_o \cdot x'_{oi} + g_k \cdot x'_{ki} \dots \dots \dots (17)$$

$$g_m y'_{mi} = G_k \cdot y'_{ki} + R \cdot x'_{Ri} \dots \dots \dots (18)$$

De même la valeur G_m alimentant la zone de rectification est la somme de la valeur G_k et de la phase G_o , ainsi le bilan matière sera effectuer juste au-dessous du plateau inférieur de la zone de rectification.

$$G_m = G_k + G_o = g_k + D \dots \dots \dots (19)$$

$$G_m y'_{mi} = G_o \cdot y'_{oi} + G_k \cdot y'_{ki} \dots \dots \dots (20)$$

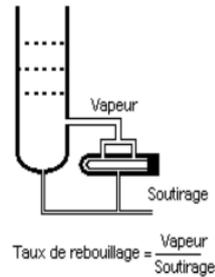
$$G_m y'_{mi} = g_k \cdot x'_{ki} + D \cdot y'_{Di} \dots \dots \dots (21)$$

3.11 Lois Fondamentales de transfert de matière :

3.11.1 Loi de DALTON :

La loi de Dalton exprime que la pression totale d'un mélange gazeux supposé parfait est la somme des pressions partielles de ses constituants.

$$P_T = \sum_i^n P_i \dots \dots \dots (22)$$



P_i : pression partielle du constituant i .

n : nombre de constituants du mélange.

P_T : pression totale du mélange.

D'après la loi des gaz parfaits « $PV = nRT$ », la loi de Dalton peut s'écrire aussi en faisant intervenir le titre molaire :

$$P_i = Y'_i \cdot P_T \dots \dots \dots (23)$$

3.11.2 Loi de Raoult et d'HENRY :

Les lois de Raoult et Henry ne sont applicables que pour les liquides. Considérons une solution idéale. On conçoit aisément que la tendance des molécules d'un constituant à s'échapper de la phase liquide soit proportionnelle à la concentration molaire de ce constituant à cette phase.

D'après la loi de RAOULT la pression partielle « P_i » d'un constituant est égale au produit de sa tension de vapeur « P_i° » à l'état pur par sa concentration molaire en phase liquide :

$$P_i = X'_i \cdot P_i^\circ \dots \dots \dots (24)$$

Dans le cas des mélanges réels les constituants obéissent à la loi d'HENRY, d'après cette loi, la pression partielle d'un constituant, la température étant fixe, est proportionnelle à la concentration molaire du constituant dissout dans la phase liquide :

$$P_i = E_i \cdot X'_i \dots \dots \dots (25)$$

E_i : constante d'Henry, dépend de la nature du constituant et de la température à l'équilibre.

Pour qu'un mélange de liquide et de vapeur soit en équilibre, il faut que la pression partielle qu'exerce chaque constituant du mélange soit la même dans les deux phases.

On peut dans ces conditions égaliser les pressions partielles données par les lois de Dalton et de Raoult :

$$Y'_i \cdot P_T = X'_i \cdot P_i^\circ \dots \dots \dots (26)$$

C'est l'équation d'équilibre.

On appelle « K_i »: Coefficient d'équilibre du constituant « i » :

$$K_i = (Y'_i / X'_i) = (P_i^\circ / P_T) \dots \dots \dots (27)$$

Pour un mélange de deux constituants A et B :

$$\alpha = (K_A / K_B) = (Y'_A \cdot X'_B) / (X'_A \cdot Y'_B) \dots \dots \dots (28)$$

Avec « α » : Coefficient de volatilité relative qui caractérise la capacité de A de passer en phase vapeur par rapport à B.

- **Utilisation de la volatilité relative :**

Dans le cas de rectification des mélanges complexes, on sera amené à effectuer des séries de calculs d'équilibre sur chaque plateau. Pour éviter le travail long et fastidieux des approximations successives, on peut utiliser une méthode simplifiée rapide donnant une précision souvent suffisante. Cette méthode fait intervenir la notion de volatilité " α_i " qui est le rapport du coefficient d'équilibre du constituant " i " à celui d'un constituant de référence " r ".

$$\alpha_i = K_i/K_r \dots \dots \dots (29)$$

En qualité de constituant de référence, on peut choisir n'importe quel constituant (habituellement le constituant le moins volatil du mélange).

Les courbes de tension de vapeur et les coefficients d'équilibre des corps de même nature chimique manifestent une similitude dans un intervalle de température relativement étroit. C'est la raison pour laquelle la volatilité relative de tel corps peut être considérée comme constante dans un intervalle de température opératoire des zones de la colonne entière. Ainsi, on se contente de calculer une valeur moyenne de la volatilité relative en prenant la moyenne géométrique des valeurs extrêmes de α aux deux bornes de l'intervalle de température.

En tenant compte de la formule précédente, l'équation d'équilibre peut être écrite sous la forme :

$$Y'_i = K_i \cdot X'_i = \alpha_i \cdot K_r \cdot X'_i \dots \dots \dots (30)$$

$$X'_i = Y'_i / \alpha_i \cdot K_r \dots \dots \dots (31)$$

La somme de ces équations écrites pour tous les constituants du mélange, donne :

$$Y'_i = K_r \sum \alpha_i \cdot X'_i = 1 \quad \text{d'où} \quad K_r = 1 / \sum \alpha_i \dots \dots \dots (32)$$

$$X'_i = 1 / K_r \cdot \sum Y'_i / \alpha_i = 1 \quad \text{d'où} \quad K_r = \sum Y'_i / \alpha_i \dots \dots \dots (33)$$

La valeur de K_r , trouvée est utilisée pour la détermination univoque de la température du système en équilibre.

En substituant la valeur de k , respectivement dans (30) et (31) on obtient :

$$Y'_i = \alpha_i X'_i / \sum \alpha_i X'_i \dots \dots \dots (34)$$

Et :

$$X'_i = (Y'_i / \alpha_i) / (\sum Y'_i / \alpha_i) \dots \dots \dots (35)$$

Lors du calcul de la condition d'équilibre liquide vapeur, l'utilisation des équations (34) et (35) permet de trouver Y'_i en fonction de X'_i ou inversement en évitant tout tâtonnement due à l'essai de la température.

3.12 Choix de la pression dans la colonne :

Selon la pression utilisée, on distingue les colonnes à vide, celles à pression atmosphérique et celles travaillant à pression élevée. Il existe plusieurs facteurs influençant sur le choix de la pression dans la colonne. Pour assurer le fonctionnement normal de la colonne, il faut créer un reflux au sommet de la colonne, c'est à dire il est nécessaire de condenser une partie de vapeur qui quitte le sommet de la colonne. Mais, pour cela on a besoin de l'agent réfrigérant.

En général, on tâche d'utiliser un agent réfrigérant de bon marché. Le plus souvent ceux sont l'eau douce, l'eau de mer ou bien l'air. En pratique, à l'aide de ces sources froides on peut refroidir des courants vapeurs jusqu'à la température $t=30^\circ\text{C}$.

Lorsque le distillat est constitué des constituants très légers, il est nécessaire (car à la température ordinaire on se trouve au-dessus de la température critique du distillat) de faire

Chapitre III : Théorie sur la Rectification

appel à une réfrigération artificielle (utilisation d'une machine frigorifique) pour travailler à basse température.

Pour certains procédés de séparation, on utilise en réel des machines frigorifiques, mais parfois ça peut être assez cher, Alors, il y a une autre possibilité. On sait que la température de condensation aussi bien que la température d'ébullition dépend de la pression du système, plus la pression du système est grande plus la température de condensation est considérable.

Quelle que soit la pression de service, la température de condensation totale des vapeurs du distillat doit être prise au moins de 15 à 20 °C plus grande que celle du fluide réfrigérant.

Ainsi, la pression P_b dans le ballon de reflux est déterminée d'après l'équation d'isotherme de la phase liquide.

$$\sum K_i \cdot X'_{D,i} = 1 \dots \dots \dots (36)$$

Par approximation successive, les pressions au sommet, au fond et dans la zone d'alimentation de la colonne seront respectivement :

$$P_s = P_b + \Delta P_1 \dots \dots \dots (37)$$

$$P_f = P_s + \Delta P_2 \dots \dots \dots (38)$$

$$P_L = (P_s + P_f) / 2 \dots \dots \dots (39)$$

Où : $\Delta P_1 = (0,2 \div 0,4)$ atm : pertes de charge dues aux résistances des conduites et du condenseur.

$\Delta P_2 = (0,3 \div 0,5)$ atm : perte de charge due aux résistances des plateaux.

3.13 Régime de température de la colonne :

A la pression de service P_s , la température au sommet de la colonne est déterminée par approximation de l'équation d'isotherme de la vapeur.

$$\sum Y'_{D,i} / K_i = 1 \dots \dots \dots (40)$$

La température au fond de la colonne (dans le rebouilleur) doit être calculée comme la température de bulle du résidu à la pression p_f .

$$\sum K_i \cdot X'_{R,i} = 1 \dots \dots \dots (41)$$

- **Taux de vaporisation et composition des phases liquide et vapeur de la charge :**

Lors du calcul de la zone d'alimentation, il est nécessaire de disposer du débit et de la composition des phases liquide et vapeur de la charge. D'après la définition du taux de vaporisation (ou de condensation) de la charge on a :

$$e'_0 = G_0 / L \quad D'où \quad G_0 = e'_0 \cdot L \dots \dots \dots (42)$$

Et :

$$r'_0 = g_0 / L \quad D'où \quad g_0 = L \cdot r'_0 \dots \dots \dots (43)$$

e'_0 : taux de vaporisation molaire de la charge.

r'_0 : taux de condensation.

G_0 : débit molaire de la phase vapeur de la charge.

g_0 : débit molaire de la phase liquide.

A pression et température données, le taux de vaporisation, ainsi que la composition des phases de la charge sont déterminés par approximations successives d'après l'équation de Trégoubov :

$$\sum X'_{0,i} = \sum X'_{L,i} / (1 + e'_0(k'_i - 1)) = 1 \dots\dots\dots(44)$$

Avec:

$$e'_0 + r'_0 = 1 \text{ et } \sum Y'_{0,i} = \sum K_i X'_{0,i} = 1 \dots\dots\dots(45)$$

$X'_{L,i}$: concentration molaire du constituant « i » dans la charge.

$X'_{0,i}$: concentration du constituant « i » dans la phase liquide.

$Y'_{0,i} = K_i X'_{0,i}$: concentration de la phase vapeur.

1) Si $e'_0 = 0$, la charge se trouve à la température de bulle et $g_D = L$, aussi $\sum K_i X'_{L,i} = 1$

2) Si $e'_0 = 1$, la charge se trouve à la température de rosée et $G_D = L$, aussi $\sum X'_{L,i} / K_i = 1$

• **Fonctionnement à reflux total :**

Dans la théorie de rectification, on utilise deux méthodes d'idéalisation du procédé permettant d'établir les cas de fonctionnement de la colonne.

L'un des cas limites est le fonctionnement à reflux total correspondant à un nombre minimal de plateaux théoriques et l'autre est le fonctionnement à reflux minimal demandant pour la séparation un nombre infini de plateaux.

A reflux total, les volatilités relatives des constituants peuvent être considérées comme constants et dans les produits obtenus (distillat et résidu), leurs volatilités relatives et le nombre minimal de plateaux théoriques est donné par la formule connue sous le nom de FENSKE-UNDERWOOD.

$$(X'_{D,i} / X'_{D,j}) = \left(\frac{\alpha_i}{\alpha_j}\right)^N \cdot (X'_{R,i} / X'_{R,j}) \dots\dots\dots(46)$$

A partir de l'équation (46), le nombre minimal de plateaux théoriques y compris le rebouilleur sera :

$$N_{min} = \text{Log} (X'_{D,i} \cdot X'_{R,j} / X'_{D,j} \cdot X_{R,i}) \cdot 1 / \text{Log} \left(\frac{1}{\alpha_i / \alpha_j}\right) \dots\dots\dots(47)$$

L'application de cette équation aux constituants clés donne :

$$N_{min} = \text{Log} (X'_{D,v} \cdot X'_{R,L} / X'_{D,L} \cdot X_{R,v}) \cdot 1 / \text{Log} \left(\frac{1}{\alpha_{V-L}}\right) \dots\dots\dots(48)$$

Chapitre III : Théorie sur la Rectification

α_{v-L} : Volatilité relative du constituant-clé volatil (v) par rapport au constituant-clé lourd (L); elle est déterminée comme la moyenne géométrique entre le sommet, le fond de la colonne et le niveau de l'alimentation, c'est-à-dire le nombre des plateaux théoriques dans les zones de rectification et d'épuisement est fixé par l'application de Fenske – Under wood aux constituants - clés entre l'alimentation et le distillat ou le résidu soit :

$$N_{Rmin} = \text{Log} (X'_{D,v} \cdot X'_{L,L} / X'_{D,L} \cdot X_{L,v}) \cdot 1 / \text{Log}(\frac{1}{\alpha_{v-L}}) \dots\dots\dots(49)$$

$$N_{Emin} = \text{Log} (X'_{L,v} \cdot X'_{R,L} / X'_{L,L} \cdot X_{R,v}) \cdot 1 / \text{Log}(\frac{1}{\alpha_{v-L}}) \dots\dots\dots(50)$$

- **Fonctionnement à reflux minimal :**

C'est un autre cas limite de fonctionnement de la colonne correspondant à un nombre infini de plateaux théoriques ; pour calculer le reflux minimal on a proposé plusieurs formules parmi-elles celle d'UNDERWOOD :

$$(rf)_{min} + 1 = \sum \frac{\alpha_{i,L} \cdot X'_{D,i}}{\alpha_{i,L} - \varphi} \dots\dots\dots(51)$$

$$(rf)_{min} = \sum \frac{\varphi \cdot X'_{D,i}}{\alpha_{i,L} - \varphi} \dots\dots\dots(52)$$

$\alpha_{i,L}$: Coefficient de volatilité du constituant i' au constituant lourd de la charge.

φ : Paramètre conventionnel déterminé par approximations successives à partir des équations suivantes :

$$e'_{\theta} = \sum \frac{\alpha_{i,L} \cdot X'_{L,i}}{\alpha_{i,L} - \varphi} \dots\dots\dots(53)$$

$$(rb)_{min} = \sum \frac{\alpha_{i,L} \cdot X'_{R,i}}{\alpha_{i,L} - \varphi} \dots\dots\dots(54)$$

e'_{θ} : Taux de vaporisation molaire de la charge.

D'une manière générale la valeur de φ se trouve dans l'intervalle $\alpha_1 < \varphi < \alpha_v$

α_1 et α_v : Etant respectivement les volatilités des constituants clés lourd et volatil.

La relation entre $(rb)_{min}$ et $(rf)_{min}$ est donnée par la formule suivante :

$$(rb)_{min} = \frac{D}{R}(rf)_{min} + \frac{L}{R}(1 - e'_{\theta}) - 1 \dots\dots\dots(55)$$

L, D, R : débits molaires respectivement de la charge du distillat et du résidu (kmol /h).

- **Taux de reflux optimal (opérateur) :**

A partir d'une alimentation il est possible de réaliser une séparation spécifique en choisissant un taux de reflux opératoire en tête de colonne.

D'une manière générale, le taux de reflux optimal (rf) est conditionné par le prix de revient des produits obtenus.

Pour calculer la valeur optimale de (rf) surtout pour la rectification des mélanges complexes actuellement on ne dispose pas des méthodes théoriques simples et sûres.

C'est pour cette raison que les données pratiques obtenues pendant l'observation du fonctionnement des colonnes industrielles sont largement utilisées.

Pour les calculs approximatifs on peut utiliser la formule proposée par GILLILAND.

$$((rf)_{opt} - (rf)_{min}) / ((rf)_{opt} + 1) = 0,1 - 0,33 \dots \dots \dots (56)$$

3.14 Calcul du nombre de plateaux par la méthode de GILLILAND :

En admettant les hypothèses de Lewis, ce qui implique que les constituants extrêmes du mélange ne soient pas trop éloignés, GILLILAND propose une corrélation empirique unique, entre le taux de reflux et le nombre d'étages théoriques pour les colonnes distillant des mélanges d'hydrocarbures légers. Si :

N_{min} : Est le nombre minimal d'étages théoriques à reflux total,

R_{min} : Le taux de reflux minimal pour un nombre infini d'étages.

N : Un nombre d'étages finis associés à un taux de reflux fini

$$\text{Alors : } \frac{N - N_{min}}{N + 1} = \frac{(rf)_{opt} - (rf)_{min}}{(rf)_{opt} + 1} \dots \dots \dots (57)$$

Nombre de plateaux réels :

Le nombre de plateau réel dans la colonne est donné par :

$$N_{réel} = (N_{Emin} + N_{Rmin}) / E \dots \dots \dots (58)$$

E : Efficacité moyenne des plateaux réels.

- **La zone de rectification :**

$$N_{réel} = N_{Rmin} / E \dots \dots \dots (59)$$

- **La zone d'épuisement :**

$$N_{réel} = N_{Emin} / E \dots \dots \dots (60)$$

3.15 Bilan thermique de la colonne :

L'établissement du bilan thermique de la colonne peut être nécessaire pour déterminer :

- La quantité de chaleur à apporter au rebouilleur.
- La quantité de chaleur à retirer du condenseur.

Ainsi que pour vérifier :

- Le débit du fluide chauffant et le débit du fluide refroidissant.
- Le débit de reflux.
- La somme des flux enthalpiques entrants doit être égale à la somme des flux enthalpiques Sortants.

Les flux enthalpiques entrant sont généralement :

Chapitre III : Théorie sur la Rectification

- La chaleur apportée au rebouilleur.
- Le flux enthalpique des produits alimentant la distillation.

Les flux enthalpiques sortants sont généralement :

- La chaleur retirée du condenseur.
- Les flux enthalpiques des produits extraits de la distillation.

L'équation du bilan thermique de la colonne entière s'écrit :

$$L \cdot h_L + Q_{Rb} = D \cdot h_D + R \cdot h_R + Q_{Con} \dots \dots \dots (61)$$

Avec :

$$h_L = \epsilon_0 \cdot H_0 + (1 - \epsilon_0) \cdot h_0 \dots \dots \dots (62)$$

$$Q_R = G_R \cdot (H_R - h_R) \dots \dots \dots (63)$$

$$Q_{Con} = (D + g_x) \cdot (H_D - h_D) \dots \dots \dots (64)$$

Où :

Q_{Rb} : Charge thermique du rebouilleur. (Kcal/h).

Q_{Con} : Charge thermique du condenseur. (Kcal/h).

ϵ_0 : Taux de vaporisation de la charge (%molaire).

H_0 : Enthalpie de la phase vapeur de la charge (Kcal/Kmole).

h_0 : Enthalpie de la phase liquide de la charge (Kcal/Kmole).

h_D : Enthalpie du distillat à l'état liquide. (Kcal/Kmol).

H_D : Enthalpie du distillat à l'état vapeur. (Kcal/Kmol).

h_R : Enthalpie du résidu à l'état liquide (Kcal/Kmol.).

H_R : Enthalpie de l'effluent provenant du rebouilleur (Kmol/h).

G_R : Débit de l'effluent provenant du rebouilleur (Kmol/h).

g_x : Débit du reflux liquide froid (Kmol/h).

A partir du bilan thermique de la colonne :

$$g_x = (r_f)_{opt} \cdot D \dots \dots \dots (65)$$

$$G_x = (r_b)_{opt} \cdot R \dots \dots \dots (66)$$

$(r_b)_{opt}$: le taux de rebouillage optimal qui est défini par :

$$(r_b)_{opt} = [(D \cdot (r_f)_{opt} / L) + (1 - \epsilon_0) - (R/L)] / (R/L) \dots \dots \dots (67)$$

Conclusion :

En conclusion, la rectification représente une méthode fondamentale et polyvalente pour la séparation des mélanges liquides en leurs constituants purs. En tant que technique de purification indispensable, la rectification continue de jouer un rôle crucial dans le développement industriel et scientifique, contribuant ainsi à la production de substances de haute qualité et à la réalisation d'opérations durables et économiques.

Chapitre IV : Présentation du Complexe CP2K

Introduction :

Le complexe CP2K, situé dans la zone industrielle de Skikda en Algérie, se distingue comme un pilier essentiel de l'industrie pétrochimique du pays. Ce chapitre s'engage à explorer l'histoire du complexe, son implantation stratégique, ses différentes zones fonctionnelles, son usine de pointe, la diversité des grades de polyéthylène haute densité (PEHD) qu'il produit.

4.1 Historique :

Le complexe a été créé dans la zone industrielle de SKIKDA en janvier 2004 suite à la signature du projet de construction d'une unité de polyéthylène haute densité en avril 1991 entre l'ENIP (Entreprise Nationale des Industries Pétrochimiques) et Repsol (Raffinerie de pétrole d'ESCombreras). Après des planifications méticuleuses et d'exécution, le complexe est inauguré le 23 mars 2005.

La collaboration s'inscrit dans le cadre de la coopération industrielle entre l'Algérie et l'Espagne sous le nom POLYMED (Méditerranéenne des Polymères). L'ENIP possédait 64% du capital de l'unité, REPSOL 23% et BAD (Banque Algérienne de Développement) 13%.

Ensuite, en Janvier 2006, l'ENIP a pris la décision de racheter les actions de REPSOL et de la BAD après leur retrait et depuis Octobre 2007, le complexe fonctionne sous une direction entièrement algérienne.

Depuis 2011, ENIP est réintégrée au groupement SONATRACH à 100% et son appellation est devenu « CP2K ». Le parcours du complexe s'est encore consolidé en 2014 avec l'intégration des utilités de l'ancien complexe CP1K (Bac de stockage, chaudières, dessaleur, Torche, etc.).

4.2 Implantation :

Le complexe CP2K occupe une position stratégique au sein de la zone industrielle de Skikda. Étendu sur 166 800 mètres carrés (16,68 hectares). Le site du projet se situe à seulement 6 kilomètres à l'est du chef-lieu de la wilaya de Skikda et à une altitude moyenne d'environ 6 mètres au-dessus du niveau de la mer.

Il est limité géographiquement :

Au Nord : par la mer Méditerranée

Au Sud : par La route principale de la zone industrielle

A l'Est : La FIR (Force d'Intervention et de Réserve)

A l'Ouest : CP1K (Complexe Pétrochimique 1 de Skikda)



Figure 4.2-1: Implantation du complexe CP2K

4.3 Présentation de l'usine :

➤ Capacité de production :

Le projet PEHD vise la construction d'une unité de production de polyéthylène haute densité (PEHD) d'une capacité annuelle de 130 000 tonnes.

➤ **Effectif** : Au 17/06/2020 y'avait 359 agents.

➤ Procédé :

L'usine de POLYMED à Skikda dispose deux procédés de production de polyéthylène haute densité au sein d'une même installation :

- **Procédé Phillips** : reposant sur l'utilisation d'un catalyseur à base de chrome, ce procédé offre une solution économique pour la production de PEHD.
- **Procédé Ziegler et Natta** : Le catalyseur est à base de tétrachlorure de titane qui permet d'obtenir des PEHD aux propriétés spécifiques.

Cependant, depuis sa mise en service, l'usine de POLYMED a privilégié l'utilisation exclusive du procédé Phillips. Ce choix s'explique par le coût élevé du catalyseur employé dans le procédé Ziegler-Natta, qui rend sa mise en œuvre moins rentable comparativement au procédé Phillips.

Chapitre IV : Présentation du Complexe CP2K

➤ Les matières premières :

Ethylène (130000 T/An)	C'est le réactif principal dans le procédé. Il s'alimente en continu, par pipe, à partir de l'unité d'éthylène du CPIK, sous une pression de 18kg/cm ² .g.
Isobutane (2 500 T/An)	Il sert comme diluant et transporteur du catalyseur et du polymère. Il est fourni, discontinu, par pipe depuis GLIK jusqu'au cigares de stockage de l'unité PEHD.
L'hexène (1430 T/An)	L'hexène est utilisé comme Co monomère pour régler la densité du polymère et l'indice de fluidité (MI : Melt Index). Il contribue aussi dans la flexibilité, résistance et cristallisation du polymère. Il est importé dans des containers puis stocké, au niveau de l'unité dans un réservoir à toit flottant sous une pression de 50 à 300mmH ₂ O.
Le catalyseur	C'est l'oxyde de chrome (Cr ₂ O ₃) supporté sur silice .Il promeut la polymérisation de l'éthylène dans une chaîne droite linéaire. Son nom commercial est MAGNAPORE 963, il provient des USA.
Hydrogène (52 T/An)	Il est utilisé comme modérateur de la réaction en contrôlant la longueur de la chaîne du polymère. Il est fourni, par camion, dans des bouteilles sous forme de cadran ou bien dans cigares, sous une pression de 200 bars.
Azote (20 millions Nm ³ /An).	Il provient de MESSER SKIKDA .

Tableau 4.3-1:Les matières premières utilisées

➤ Destination de produit :

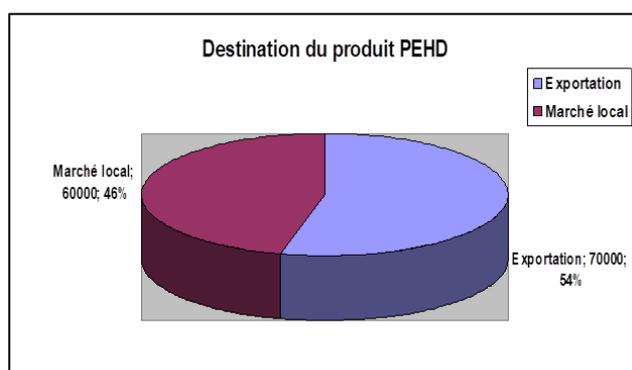


Figure 4.3-1:Schéma représente les destinations du produit PEHD

- **Marché national** : Alimentation de l'industrie nationale de transformation du plastique, notamment les entreprises publiques ENPC et ENCG ainsi que le secteur privé. Le PEHD trouve son utilisation dans la fabrication de films agricoles, de filets de pêche, de sacs et d'articles de ménage, contribuant ainsi au développement de divers secteurs économiques.
- **Marché international** : Exportation de l'excédent de production, diversifiant les revenus du pays et positionnant l'Algérie comme acteur clé dans le domaine du PEHD.

4.4 Composition de l'unité :

Le complexe est composé de 04 zones importantes qui sont :

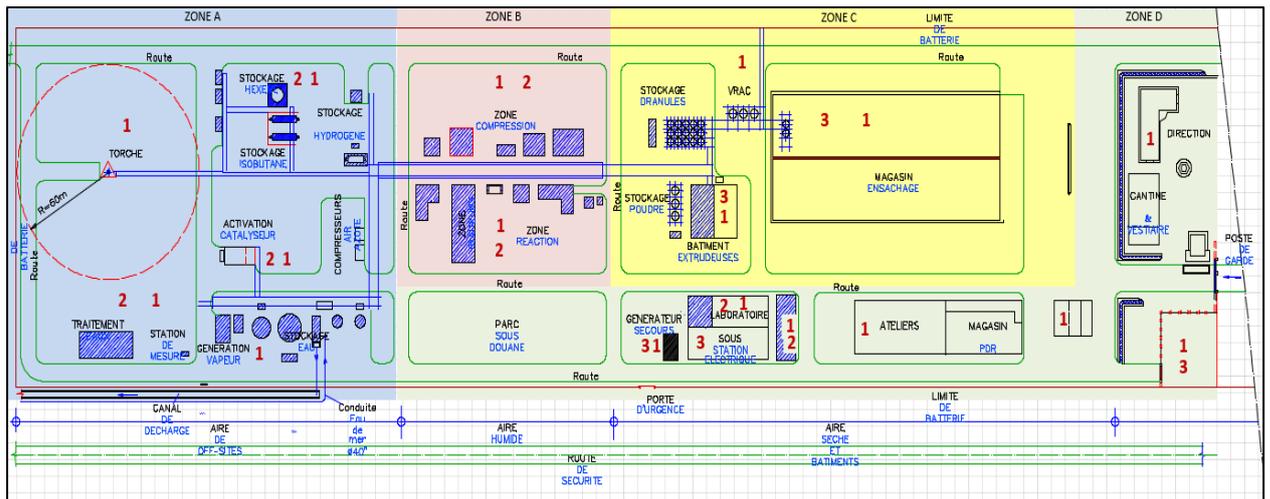


Figure 4.4-1: Plan de masse du complexe

Zone d'off site :

- Les utilités (chaudières, air, azote, eau dessalée, eau anti incendie, eau potable et détente de gaz).
- Torche.
- Stockage isobutane, hexène et hydrogène.
- Traitement des eaux usées.
- Activation catalyseur.

Zone humide :

- Traiteurs.
- Réacteurs.
- Compresseurs.
- Capacités.

Zone sèche :

- Extrudeuse.
- Soufflantes.
- Silos de stockage produits finis (poudre et granulé).
- Ensachage.

Zone bâtiment :

- Poste de garde
- Bloc ADM et finance
- Cantine et vestiaires
- Bloc sécurité infirmerie
- Magasin pièces de rechange, ateliers et bloc technique.
- Sous stations haute et basse tension
- Salle de contrôle et laboratoire.

4.5 Organisation de CP2K :

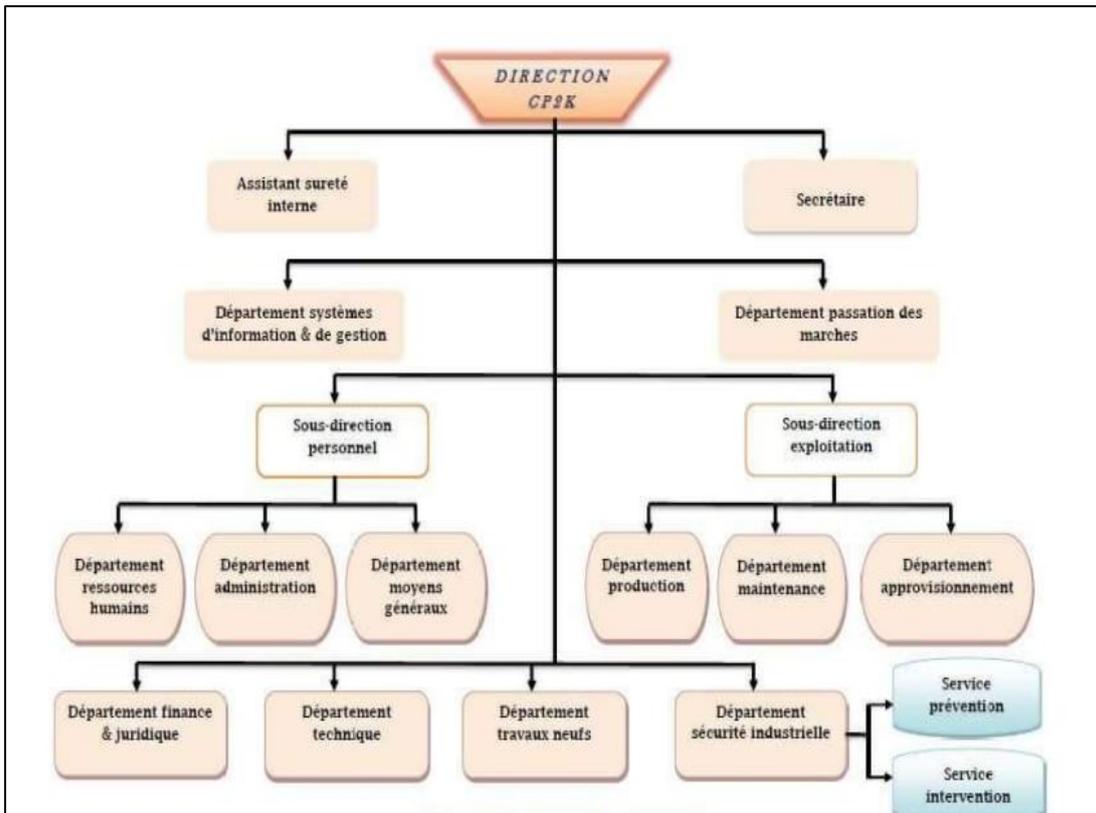
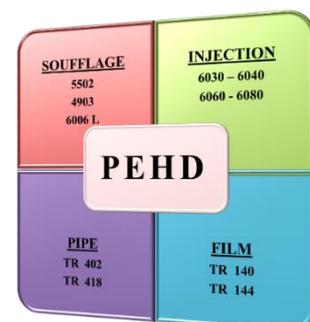


Figure 4.5-1:Schéma de l'organisation d'unité CP2K

4.6 Grades du PEHD produits au niveau de CP2K :

Le PEHD se décline en une multitude de grades, chacun présentant des propriétés et des applications spécifiques. Pour répondre à la diversité des besoins du marché, le complexe CP2K propose une gamme complète de onze grades de PEHD, soigneusement élaborés pour répondre aux exigences précises de chaque utilisation.



Chapitre IV : Présentation du Complexe CP2K

Le tableau suivant résume les caractéristiques principales de chaque grade, en mettant en avant leur indice de fluidité et leur densité. Ces deux paramètres clés influencent directement les propriétés du PEHD :

Grade	Indice de fluidité (I) (g/10min)	Densité (d) (g/cm ³)	Applications
<i>PEHD 5502</i>	0,35	0,955	Des bouteilles de petites et moyennes capacités (Eaux minérales, Cosmétiques, Produits pharmaceutiques...)
<i>PEHD 6006 L</i>	0,5-0,7	0,955-0,958	Petites bouteilles (Lait stérilisé, Jus de fruits et boissons douces, Dissolvant doux tels que de l'eau distillé, alcool, acétone.)
<i>PEHD 4903</i>	0,18-0,4	0,947-0,95	Bouteilles de grandes et moyennes capacités, Grands récipients industriels, Réservoirs Accessoires automobiles ..
<i>PEHD 6030</i>	2 - 3	Min 0,96	Des bouchons de bouteille et de fût.
<i>PEHD 6040</i>	3 - 5	Min 0,96	
<i>PEHD 6060</i>	7- 9	Min 0,96	Des Caisses, Bidons de peinture, Jouets et articles divers
<i>PEHD 6080</i>	7 - 9	Min 0,9600	
<i>PEHD TR 140</i>	0,3	0,947	Film agricole et sacherie
<i>PEHD TR 144</i>	0,16-0,22	0,943-0,947	Film pour sacs, Sacs poubelle, Sachets tous usage...
<i>PEHD TR 402</i>	0,08-0,14	0,941-0,946	La fabrication de tubes pour réseaux de distribution d'eau potable, gaz Combustibles, irrigation.
<i>PEHD TR 418</i>	0,08-0,14	0,941-0,946	

Figure 4.6-1: Grades du PEHD produits à CP2K

4.7 Différents procédés de fabrication du PEHD :

Le procédé Standard Oil (procédé Zletz) : basé sur l'emploi d'un catalyseur à l'oxyde de molybdène, est maintenant, totalement abandonné.

Le procédé Phillips : est basé sur l'emploi d'un catalyseur à l'oxyde de chrome (Cr₂O₃) sur un support de silice et/ou d'alumine. Le premier procédé Phillips consistait en une polymérisation en solution dans le cyclohexane. Il a été supplanté par le procédé particle-form beaucoup plus économique en énergie, dans lequel la réaction s'effectue en suspension dans un hydrocarbure liquide, généralement l'isobutane en utilisant le même catalyseur.

Le procédé Ziegler : est fondé sur l'emploi d'un catalyseur à base de tétrachlorure de titane associé à un composé organométallique.

4.8 Description du procédé Phillips :

Le procédé Phillips, connu sous le nom de PF Process, qui a été conçu pour l'usine de POLYMED, consiste à la polymérisation catalytique de l'éthylène dans un réacteur tubulaire continu, en phase liquide (formant une suspension dans l'isobutane). L'Usine est conçue pour produire des polymères d'une densité comprise entre (0,935 et 0,965g.cm³), avec un index de fluidité de 0,1 à 36 (g/10min) et plus.

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.
- Hydrogène en phase gazeuse avec de faibles quantités.

Le catalyseur : l'oxyde de chrome (Cr₂O₃) supporté sur silice.

Les conditions opératoires de la réaction de polymérisation :

La réaction chimique, fortement exothermique (800 kcal/kg), a lieu à une température qui est comprise entre 85 et 110°C selon le grade à produire, et à une pression de 42 à 44 bars.

Les sections de l'usine :

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.

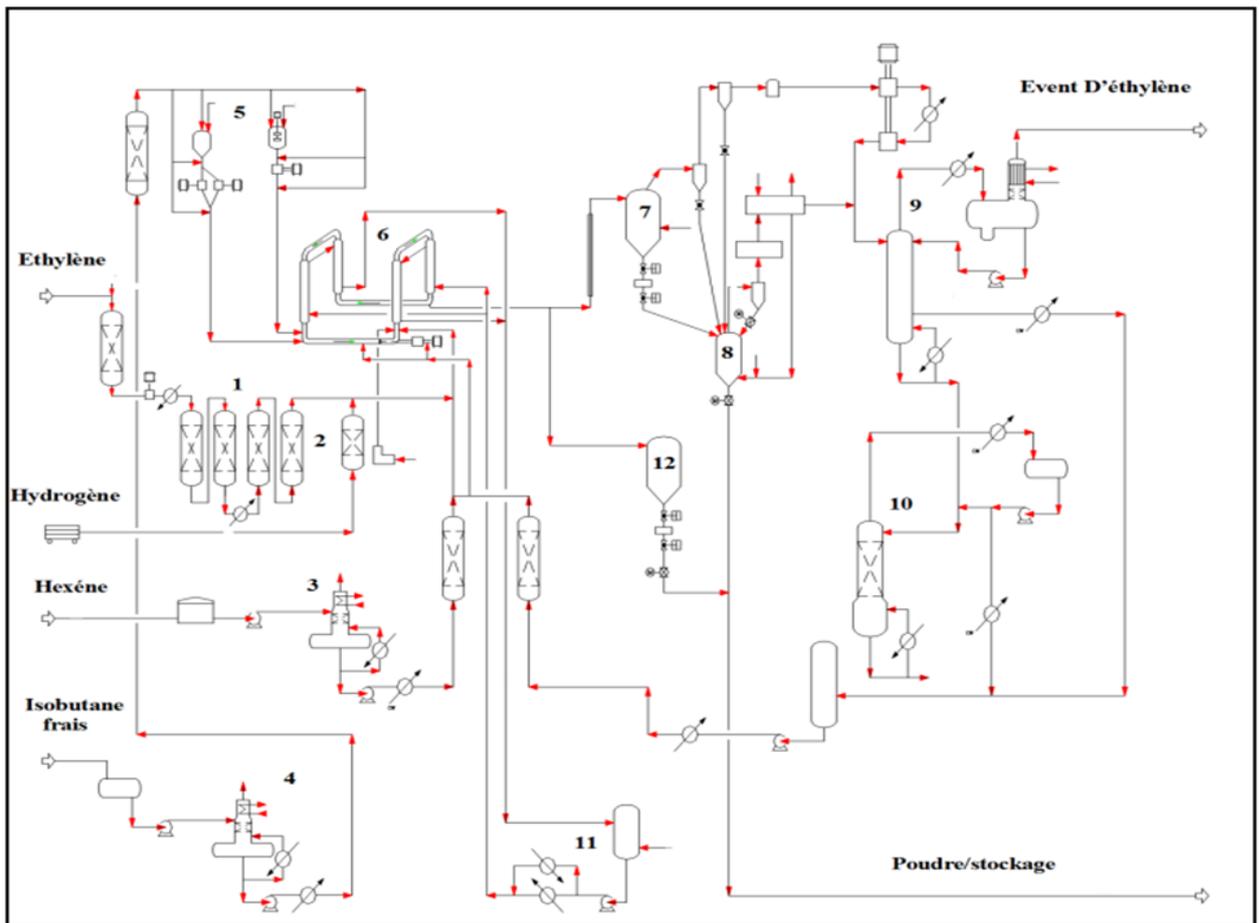


Figure 4.8-1:Schéma du procédé Phillips pour la production de PEHD

4.8.1 Préparation et traitement des matières premières :

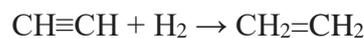
Il est nécessaire de soumettre les matières premières à un processus de traitement, afin d'obtenir le degré de pureté exigé par la réaction de polymérisation. Le traitement consiste à éliminer les composés qui peuvent être un poison pour le catalyseur.

4.8.1.1 ETHYLENE :

L'éthylène est reçu dans l'usine moyennant une tuyauterie provenant du complexe CPIK, à 16,9 bars et à température ambiante. Il contient des teneurs en acétylène, monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, humidité, oxygène et méthanol qui sont considérées comme substances toxiques pour le catalyseur de la réaction.

➤ *Élimination de l'acétylène :*

Le courant d'éthylène passe en premier lieu par le premier réacteur pour l'élimination de l'acétylène. La réaction se fait par addition de l'hydrogène en utilisant un catalyseur à base de Palladium :



Les conditions opératoires sont :

- Débit d'éthylène : 23.190 kg/h
- Pression : 15,8 kg/cm²
- Température : 20 à 40°C
- Débit de l'hydrogène : 0 à 37,5 g/h

➤ **Élimination de l'oxygène :**

De la sortie du compresseur d'éthylène, le courant arrive au réacteur d'élimination de l'oxygène, à travers le réchauffeur d'éthylène fonctionnant à la vapeur d'eau, pour maintenir la température dans le courant d'éthylène d'alimentation au réacteur à 124°C.

L'élimination de l'oxygène se fait avec un catalyseur à base de cuivre :



Les conditions d'opération sont :

- Débit de l'éthylène : 23.190 kg/h
- Pression : 57,2 kg/cm²
- Température : 124°C

➤ **Élimination du monoxyde de carbone :**

Le courant d'éthylène continue son parcours en passant par le réacteur d'élimination du monoxyde de carbone. Le monoxyde de carbone est éliminé dans le réacteur avec un catalyseur à base de cuivre selon la réaction suivante :

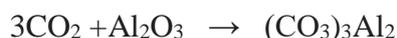


Les conditions d'opération sont :

- Débit de l'éthylène : 23.190 kg/h
- Pression : 57,2 kg/cm²
- Température : 124°C

➤ **Élimination du dioxyde de carbone :** Le courant d'éthylène provenant du fond du réacteur d'élimination de monoxyde de carbone, entre dans le refroidisseur d'éthylène où il est refroidi jusqu'à une température de 38°C. De celui-ci, il passe au sécheur, pour alimenter enfin le réacteur d'élimination du dioxyde de carbone.

Le catalyseur utilisé est à base d'alumine et l'oxyde de sodium :



Chapitre IV : Présentation du Complexe CP2K

Le dioxyde de carbone forme un composé complexe avec l'oxyde de sodium à l'intérieur de la structure moléculaire de l'alumine. Il sera retenu par l'alumine jusqu'à ce que les gaz chauds de régénération rompent les liaisons et que le dioxyde de carbone soit entraîné hors du lit.

Les conditions normales d'opération sont :

- Débit de l'éthylène : 23.190 kg/h
- Pression : 56,2 kg/cm²g
- Température : 38°C

➤ *Élimination de l'eau et du méthanol :*

L'éthylène est séché dans un sécheur. En le traversant dans le sens ascendant, l'eau et le méthanol sont retenus par des tamis moléculaires.

Les conditions normales d'opération sont :

- Débit de l'éthylène : 23.190 kg/h
- Pression : 56,2 kg/cm²g

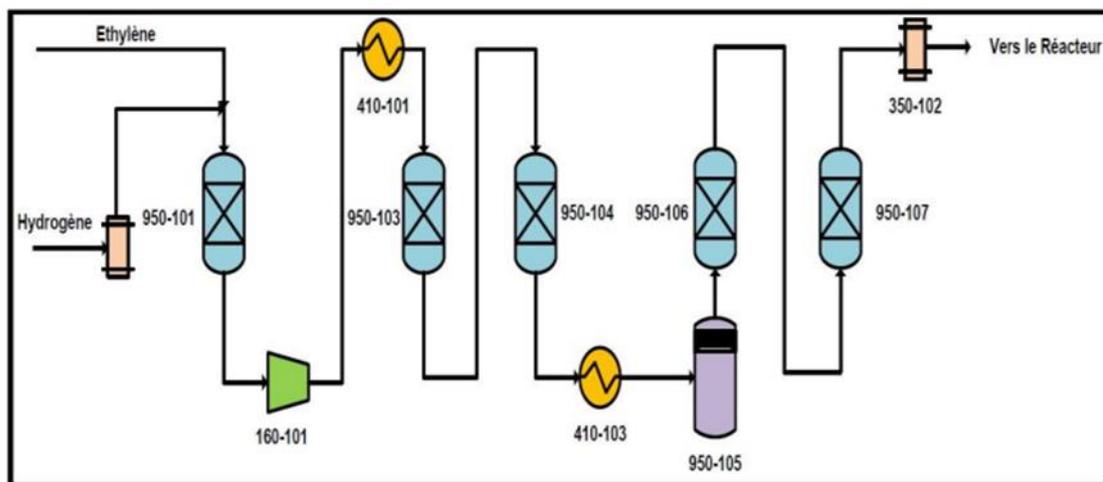


Figure 4.8-2: Traitement de l'Éthylène dans la série des traiteurs

4.8.1.2 HEXÈNE :

L'hexène spécifié pour la réaction arrive à l'usine par camion-citerne, à pression atmosphérique et température ambiante. L'addition de l'hexène contrôle la densité du produit en altérant la structure du polymère par des ramifications.

Il est soumis à un processus d'élimination de l'eau et du gaz absorbés dans le courant. Pour cela, il est traité dans une colonne de dégazage. Ensuite, à la sortie de la colonne, il est séché dans le traicteur d'élimination de l'eau, qui fonctionne par adsorption en utilisant des tamis moléculaires.

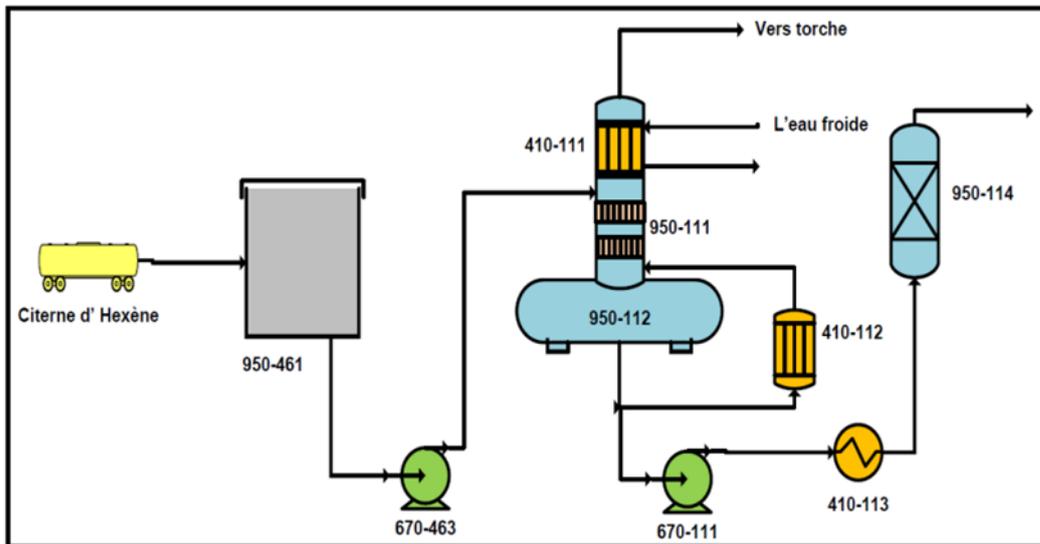


Figure 4.8-3: Traitement de l'Hexène

4.8.1.3 ISOBUTANE :

Il existe deux types d'isobutane

4.8.1.3.1 L'isobutane frais :

L'isobutane frais spécifié pour la réaction peut arriver à l'Usine par la tuyauterie depuis l'Installation d'isobutane ou par le déchargement de camions-citernes. Cet isobutane est utilisé dans les systèmes d'addition de catalyseurs, dans le dépôt de charge du Scavenger et dans la pompe du réacteur.

L'isobutane frais est soumis à un processus d'élimination de l'eau et du gaz absorbés dans une colonne de dégazage à une pression de $10,7 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ et une température de 90°C .

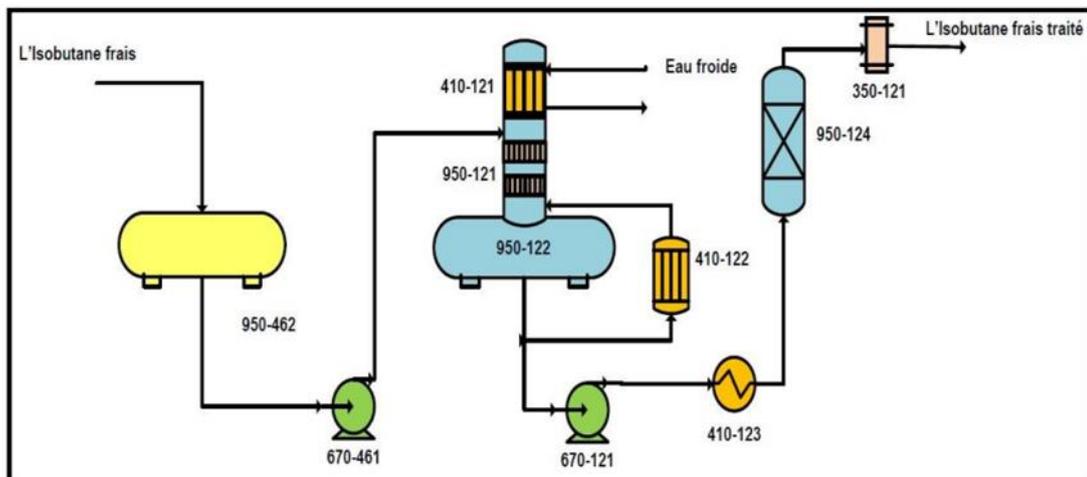


Figure 4.8-4: Schéma représentant le traitement de l'isobutane frais.

4.8.1.3.2 L'isobutane de recyclage :

Il est pompé du réservoir de stockage vers le sécheur d'isobutane de recyclage à une pression de 69,3 kg/cm²g. Il alimente le sécheur à travers le refroidisseur, dans lequel la chaleur générée lors du pompage est éliminée. Après le refroidisseur, l'eau est éliminée du courant d'isobutane et reste retenue dans un lit de tamis moléculaires. L'isobutane de recyclage, sec et purifié, est utilisé comme solvant (milieu réactionnel) dans le réacteur.

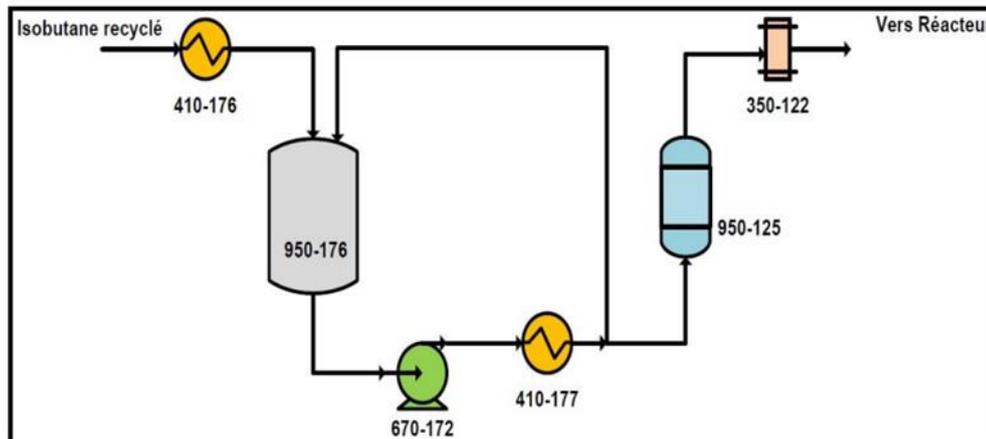


Figure 4.8-5: Schéma représentant le système de traitement de l'isobutane recyclé

4.8.1.4 HYDROGENE :

L'hydrogène est reçu à l'usine dans des cylindres à 40°C. Il est ajouté au réacteur pour contrôler l'indice de fluidité du polymère.

L'hydrogène est séché dans un sécheur et passe ensuite par un filtre qui élimine des particules dont le diamètre est supérieur à 5 µm avant son entrée dans le réacteur. Les conditions de pression et de température sont de 61 kg/cm²g et 63°C respectivement.

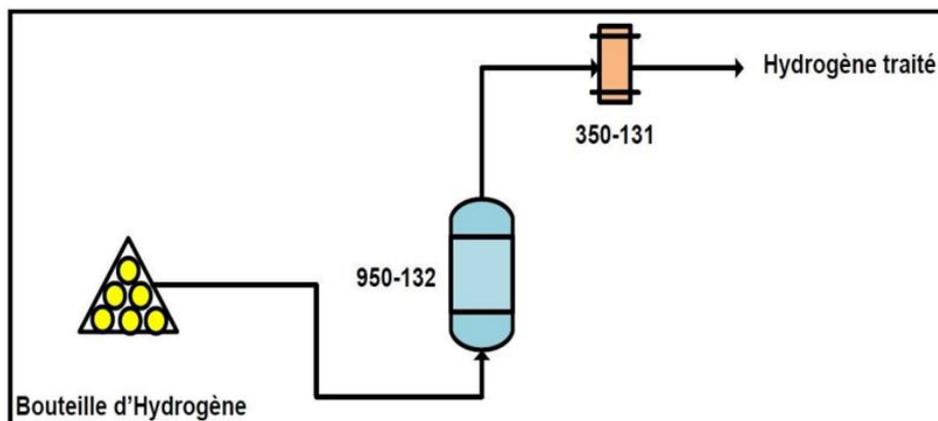


Figure 4.8-6: Traitement de l'hydrogène

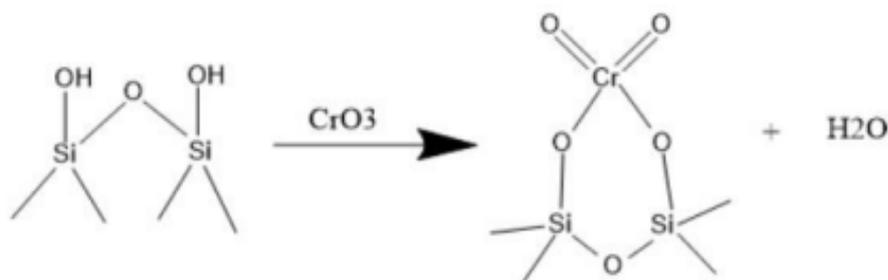
4.8.2 Le catalyseur de la polymérisation PF et son activation :

Le catalyseur de la réaction de polymérisation est l'oxyde de chrome. Avant d'être incorporé au réacteur, il exige un processus préalable d'oxydation (activation), il doit être activé

Chapitre IV : Présentation du Complexe CP2K

moyennant le chauffage, par lots, 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 Cr (III) à Cr (VI) (changement de la valence de 3 à 6). Dans le réacteur, en contact avec l'éthylène, la valence du chrome passe de Cr (VI) à Cr (II). Ce dernier polymérise l'éthylène en polyéthylène.



4.8.3 Le réacteur :

Le réacteur est une tuyauterie en acier de carbone de diamètre interne de 560 mm en forme de boucle, d'une capacité de 78,3 m³ et d'une longueur de 304 m. Le liquide contenu dans le réacteur circule approximativement à 8,2 m/s. La réaction de polymérisation est exothermique, à 800 kilocalories par kilogramme de polymère formé.



Figure 4.8-7::Le réacteur utilisé à CP2K

4.8.3.1 Alimentation :

Après traitement des matières premières dans les différentes sections précédentes, elles sont envoyées vers le réacteur pour l'alimenter. L'isobutane de recyclage, l'hydrogène, l'hexène-1 et l'éthylène arrivent au réacteur par une ligne principale d'alimentation de réacteur.

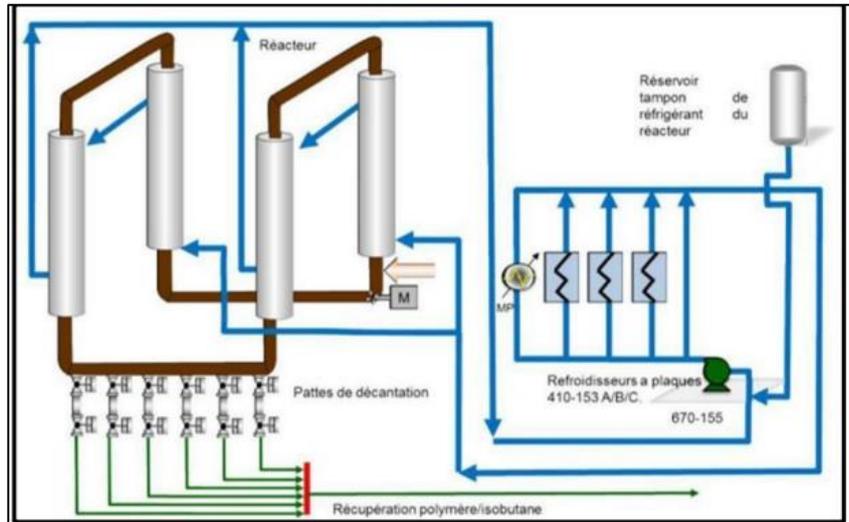
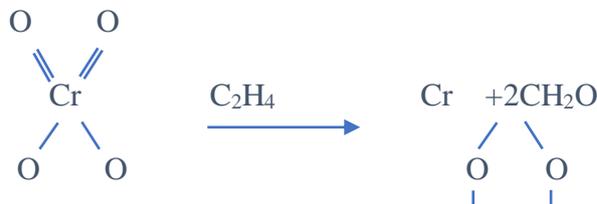


Figure 4.8-8: Schéma montrant le réacteur du procédé

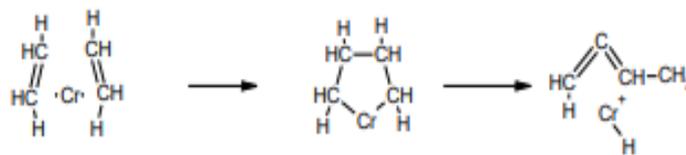
4.8.3.2 Mécanisme réactionnel :

La polymérisation de l'éthylène avec le catalyseur PF est radicaloionique, cependant elle suit les trois étapes : Initiation, propagation et terminaison

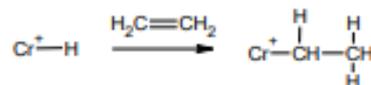
Le catalyseur passe d'abord par son état de réduction selon la réaction :



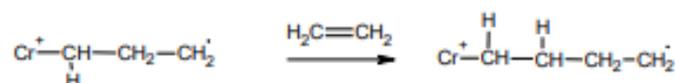
- **Initiation** : dans cette étape, il y a formation de fragment libre sur la base de déplacement électrochimique au niveau de Cr avec changement de valence.



- **Propagation** :



Où



- **Terminaison par dismutation :**



Pendant une heure de résidence des réactifs dans le réacteur, il y a une production continue du polymère sous forme de poudre. La poudre circule avec les réactifs dans l'isobutane.

4.8.3.3 Pattes de décantation de la poudre :

Le fond du réacteur comporte 6 pattes de décantation, chacune possédant 2 vannes en série, une vanne de blocage en tête et une vanne de décharge au fond, qui s'ouvrent et se referment alternativement pour récupérer la poudre.

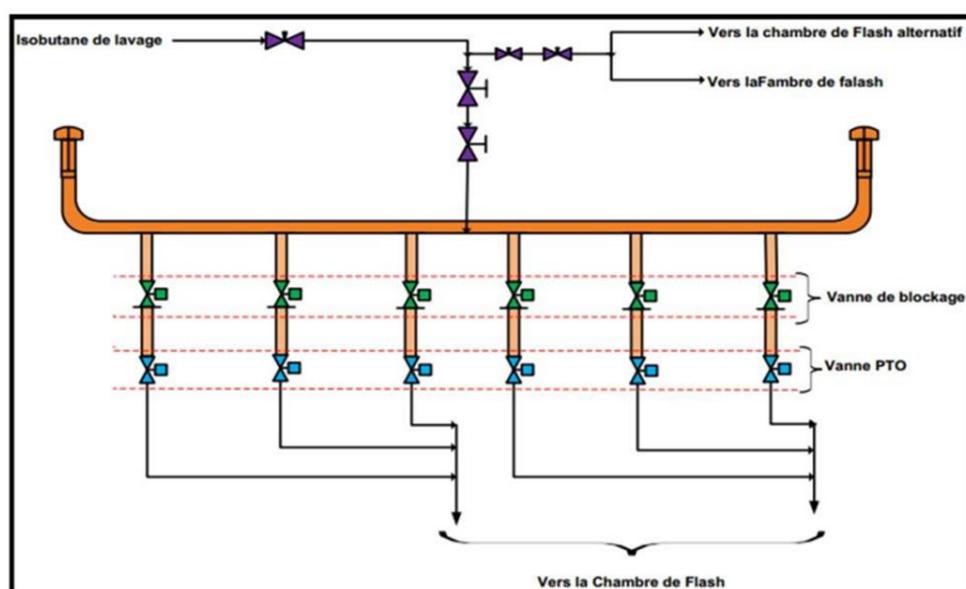


Figure 4.8-9: Schéma montrant les pattes de décantation

La poudre déchargée du réacteur est conduite par les 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 l'isobutane. L'isobutane est récupéré en tête de la chambre de flash et le polymère est mené par le fond vers la colonne de purge.

4.8.3.3.1 Chemin de la poudre (Transport pneumatique et de finition) :

Dans la chambre de flash, le polymère se décharge par gravité à partir du fond de la chambre de flash à la colonne de purge.

Les hydrocarbures présents dans les pores de polymère, sont éliminés dans la colonne de purge. A la base de celle-ci, on injecte de l'azote pour séparer les traces d'hydrocarbure. Le polymère déjà sec se décharge par le fond de celle-ci vers les silos de poudre au moyen du transport pneumatique. Le gaz de purge, qui sort par la tête de la colonne est envoyé au système de récupération, à travers le filtre à manches de la colonne, pour séparer l'isobutane et l'azote présent dans le courant.

Chapitre IV : Présentation du Complexe CP2K

Une fois la poudre déchargée de la colonne de purge, elle entre dans le système de transport pneumatique et de finition, dans l'aire sèche de l'usine

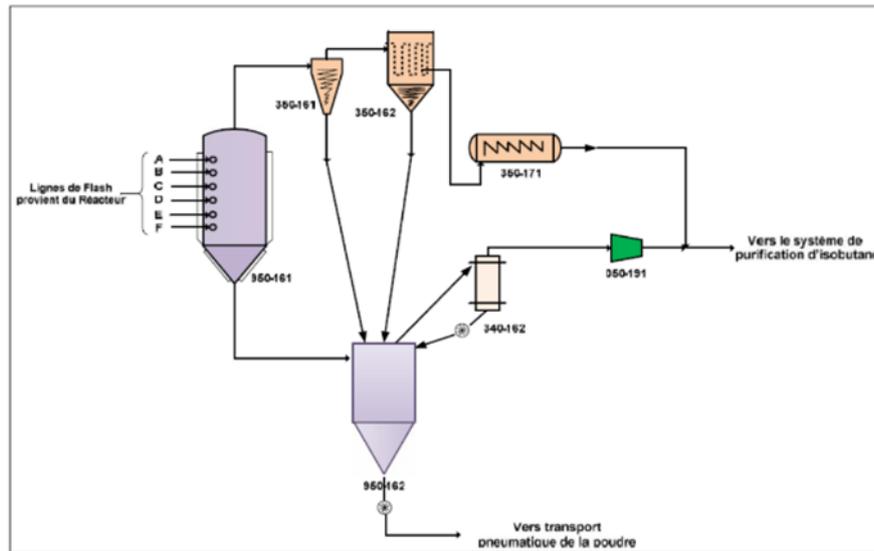


Figure 4.8-10: Système de récupération du polymère

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 : Silos de stockage de poudre
En vrac

Figure : Silos de stockage des
granulés

Figure : Silos de stockage de
la poudre

Figure 4.8-11: silo du PEHD

Avant d'introduire de la poudre dans l'extrudeuse, elle passe par un système de dosage pour ajouter des additifs (antioxydant, des brillants, ...). 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 2,1 mm de longueur.

Le granulé de sortie de l'extrudeuse, après séchage, se décharge dans les silos mélangeurs, puis dans les silos de produit fini ou bien le silo hors spécification, moyennant le transport pneumatique avec de l'air. Finalement, elle est envoyée vers les silos de stockage de granulés pour être commercialisé en vrac ou vers les silos d'alimentation des lignes d'ensachage, moyennant le transport pneumatique avec de l'air.

L'ensachage est une ligne complète d'un système automatique d'emballage du PEHD en granulés. Cette ligne est équipée d'une ensacheuse munie d'un doseur massique à poids net et une soudeuse des sacs, d'un transporteur avec une imprimante et un détecteur de métaux, un palettiseur avec un contrôleur de vitesse et d'une emballeuse, afin d'obtenir une palette avec 11 couches, chacune contient 5 sacs de 25 kg



Figure 4.8-12: stockage du produit fini

4.8.3.3.2 Chemin du gaz :

Le gaz de flash provenant de la tête de la chambre de flash est soumis à un système de récupération de solides, purification et récupération du solvant. Une fois les solides récupérés, le gaz est envoyé à un système de purification du gaz à travers le compresseur de gaz de recyclage. Après la compression, le courant entre dans la colonne d'isobutane de recyclage pour séparer l'isobutane de l'éthylène.

4.8.3.4 Système de colonne d'isobutane de recyclage :

La vapeur provenant du compresseur de gaz de recyclage, conjointement l'isobutane de la vidange des sécheurs d'isobutane de recyclage et les liquides récupérés du gaz d'isobutane de purge, est alimenté à la colonne d'isobutane de recyclage.

La colonne, calorifugée pour la conservation de chaleur, de 1370 mm de diamètre et 22.650 mm de hauteur, a une capacité de 33,5 m³, avec des conditions d'opération de 13,4 kg/cm²g et 110oC au fond et 13,2 kg/cm²g et 67oC à la tête, ses conditions de design sont de 15 kg/cm²g et 170oC respectivement pour la pression et la température.

La colonne, avec 34 plateaux, est conçue pour maintenir dans l'isobutane de recyclage une teneur inférieure à 5 ppm en éthylène, pour éliminer un peu d'hexène-1 ainsi que pour dégazer l'isobutane en éliminant les gaz absorbés.

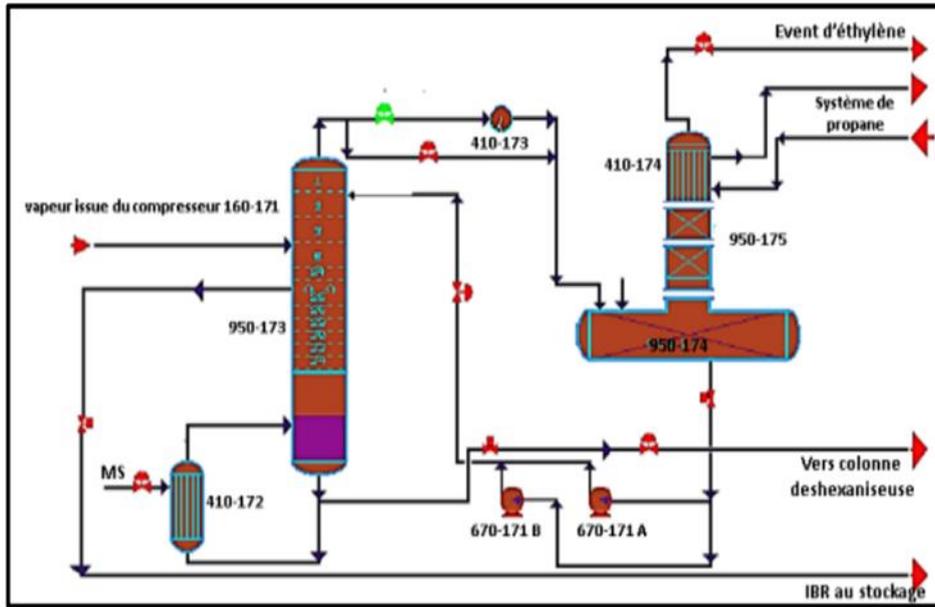


Figure 4.8-13:schéma présentant le système de colonne d'isobutane de recyclage

- **L'extraction latérale** : L'isobutane de recyclage, extrait du 25^{ème} plateau, est envoyé vers le réservoir de stockage. Cet isobutane contient une concentration en éthylène inférieure à 5 ppm. On a prévu une prise d'échantillon pour analyser la teneur en éthylène et en hexène dans l'isobutane vers le stockage, moyennant le chromatographe de gaz.

- **Récupération de tête** : La vapeur de tête est envoyée à l'accumulateur de la colonne 950-174 à travers le condenseur de la colonne 410-173, situé en tête de celle-ci. A partir de celui-ci, le reflux est envoyé à la partie supérieure de la colonne à travers une pompe.

- **Récupération de fond** : Le liquide de fond de la colonne d'isobutane de recyclage est envoyé au rebouilleur de la colonne ou bien comme alimentation à la colonne deshexaniseuse.

La colonne est équipée de :

- **Rebouilleur** : La vapeur du fond de la colonne est apportée par le rebouilleur de la colonne de recyclage, avec un échange de chaleur de 715,936 kcal/h et une surface d'échange de 24,9 m². Il s'agit d'un échangeur à calandre et tubes, avec de la vapeur à moyenne pression dans la calandre, de l'isobutane et de l'hexène provenant du fond de la colonne dans les tubes, construit en acier au carbone. Il dispose de 260 tubes de 19,05 mm de diamètre et de 1600 mm de longueur à l'intérieur d'une calandre de 488 mm de diamètre interne et d'une hauteur entre les brides de 3,499 mm.
- **Condenseur** : Les vapeurs de tête de la colonne d'isobutane de recyclage se condensent partiellement dans le condenseur de la colonne de recyclage située à la tête de celle-ci, avec une chaleur échangée de 1812,397 kcal/h et une surface de transfert de chaleur de 167,67 m². Il s'agit d'un échangeur à calandre et tubes, avec de l'eau de réfrigération dans les tubes et de l'isobutane riche en éthylène dans la calandre, construit en acier au carbone. D'un diamètre externe de 894 mm et d'une longueur totale de 5,235 m, il dispose de 412 tubes en U, d'un diamètre de 19,05mm et d'une longueur de 3400 mm.
- **Accumulateur** : La sortie du condenseur de la colonne de recyclage alimente l'accumulateur de la colonne de recyclage. Le reflux vers la colonne d'isobutane de recyclage est envoyé par le fond de celui-ci, au moyen de la pompe de reflux à la colonne de recyclage. Le dépôt

Chapitre IV : Présentation du Complexe CP2K

d'un diamètre interne de 1.525 mm et d'une longueur entre tangentes de 4.580 mm, et une capacité de 9,35 m³, avec des conditions d'opération de 12,85 kg/cm²g et 380C, a des conditions de design de 15 kg/cm²g et 630C, respectivement pour la pression et la température.

Conclusion :

La production de CP2K n'est pas uniforme pour tous les grades. En effet, l'entreprise s'efforce de suivre les tendances du marché et de répondre à la demande croissante de certains grades spécifiques. Cette approche permet de garantir une meilleure satisfaction des clients et une optimisation des ressources de production.

Chapitre V : Calcul de vérification des paramètres de fonctionnement de la colonne de purification de l'isobutane

Enoncé de la problématique :

La diminution de la capacité de traitement dans la section de purification, ainsi que l'élimination de certaines opérations, ont conduit à la nécessité de déterminer et de recalculer les paramètres de fonctionnement de la colonne de purification. Un mauvais réglage de ces paramètres peut affecter la qualité des produits obtenus, les écartant des spécifications attendues. Actuellement, les paramètres de fonctionnement de cette colonne sont déterminés par tâtonnements par le personnel exploitant. Mon objectif est de déterminer et de recalculer les nouveaux paramètres de fonctionnement, en respectant les spécifications des produits à obtenir, en maintenant une teneur minimale d'autres constituants dans l'isobutane de recyclage.

4.9 La colonne de purification de l'isobutane existante au niveau de CP2K :

La colonne de purification de l'isobutane au sein du complexe CP2K est conçue pour séparer les gaz provenant de la chambre de flash et récupérer l'isobutane recyclé afin de le réutiliser dans le circuit de production. Pour assurer une réutilisation efficace, l'isobutane doit avoir une pureté élevée. Cette colonne, qui comporte 34 plateaux, est spécifiquement conçue pour maintenir une teneur en éthylène inférieure à 5 ppm dans l'isobutane recyclé, éliminer une certaine quantité d'hexène-1, et dégazer l'isobutane en éliminant les gaz absorbés.

4.10 Bilan de matière de la colonne de purification de l'isobutane :

Pour établir le bilan de matière de la colonne de purification, l'étude a été réalisée en se concentrant sur le PEHD grade 5502, qui est le produit le plus couramment fabriqué par le complexe CP2K. Ce choix est motivé par la disponibilité des données spécifiques à ce grade. Dans cette analyse, nous négligeons toutes les pertes des matières premières et intermédiaires par rapport aux débits réels des mêmes matières.

- **Alimentation de la colonne de purification :**

- ✓ **Calcul de débit :**

Le débit du gaz qui alimente la colonne de purification est calculé comme suit :

$$m_{\text{gaz/CP}} = m_{\text{tête}} / CF + m_{N_2/c_p} - m_{\text{pol/cf}}$$

Avec : CP : colonne de purification

CF : colonne de flash

$$m_{\text{gaz/CP}} = 9577.62 + 37.1 - 222.78$$

$$m_{\text{gaz/CP}} = 9391.94 \text{ kg/h.}$$

Chapitre V : Calcul de vérification des paramètres de fonctionnement de la colonne de purification de l'isobutane

Le tableau ci-dessus représente la composition et le débit chaque constituant de l'alimentation de la colonne de purification d'isobutane :

Constituants	Mi	X _{Li} '	X _{Li}	Quantité	
				Kg/h	Kmol/h
Ethylène	28.05	0.0706	0.0354	333	11.8716
Isobutane	58.12	0.92	0.9583	9000	154.852
Hexène	84.16	0.0015	0.0023	21.84	0.2595
Azote	28.01	0.0079	0.004	37.1	1.3245
Total	198.34	1	1	9391.94	168.3076

Tableau 4.10-1:Composition du gaz d'alimentation de la colonne de purification venant de CF

- **Le reflux de la colonne de purification :**

Le débit du reflux de la colonne de purification est de : $m_{ref/CP} = 9199 \text{ kg/h}$.

La composition de ce reflux est de :

Composé	Fractions massique	Débit (kg/h)	Fractions Molaire	Débit Molaire
Ethylène	0.0748	688.08	0.1433	24.53
Isobutane	0.9239	8498.96	0.8542	146.23
Hexène	0	0	0	0
Azote	0.0013	11.96	0.0025	0.426
Total	1	9199	1	171.186

Tableau 4.10-2:Composition et débit massique de reflux.

Chapitre V : Calcul de vérification des paramètres de fonctionnement de la colonne de purification d'isobutane

- **Composition et débit massique et molaire d'off gaz, de soutirage, du résidu :**
Soit :

L' : Débit molaire de la charge d'alimentation par unité de temps.

V' : Débit molaire de gaz sortant par unité de temps.

S' : débit molaire de soutirage par unité de temps.

R' : Débit molaire de résidu sortant par unité de temps.

L'équation de bilan matière globale s'écrit :

$$L' = V' + S' + R'$$

Le bilan matière partiel de la colonne s'écrit :

$$L' \cdot X'_{L,i} = V' \cdot Y'_{v,i} + S' \cdot X'_{s,i} + R' \cdot X'_{R,i}$$

$X'_{L,i}$, $Y'_{v,i}$, $X'_{s,i}$, $X'_{R,i}$: Sont les fractions molaires de l'élément « i » respectivement dans la charge, la gaz, le soutirage et le résidu.

Donc :

$$L' \cdot X'_{L,C2} = V' \cdot Y'_{v,C2} + R' \cdot X'_{R,C2} + S' \cdot X'_{s,C2} \dots\dots\dots(1)$$

$$L' \cdot X'_{L,N2} = V' \cdot Y'_{v,N2} + S' \cdot X'_{s,N2} \dots\dots\dots(2)$$

$$L' \cdot X'_{L,iC4} = V' \cdot Y'_{v,iC4} + S' \cdot X'_{s,iC4} + R' \cdot X'_{R,iC4} \dots\dots\dots(3)$$

$$L' \cdot X'_{L,c6} = R' \cdot X'_{R,C6} \dots\dots\dots(4)$$

Les Compositions molaires des constituants clés :

$$Y'_{v,IC4} = 0.0279, X'_{R,IC4} = 0.2293, X'_{s,IC4} = 0.9839.$$

$$Y'_{v,C2} = 0.8572, X'_{R,C2} = 0.159, X'_{s,C2} = 0.0139.$$

$$Y'_{v,c6} = 0, X'_{R,C6} = 0.611, X'_{s,C6} = 0$$

$$Y'_{v,N2} = 0.1147, X'_{R,N2} = 0, X'_{s,N2} = 0.002$$

$$\text{D'après (4) : } R' = (L' \cdot X'_{L,c6}) / X'_{R,C6} = (168.3076 \cdot 0.0015) / 0.611 = 0.4132 \text{ kmol/h .}$$

$$\text{D'après (2) : } S' = (L' \cdot X'_{L,N2} - V' \cdot Y'_{v,N2}) / X'_{s,N2} = 664.815 - 57.35V'.$$

On remplace dans (3) :

Chapitre V : Calcul de vérification des paramètres de fonctionnement de la colonne de purification d'isobutane

$$V' = (L' \cdot X'_{L,iC4} - S' \cdot X'_{S,iC4} - R' \cdot X'_{R,iC4}) / Y'_{v,iC4}$$

$$= (168.3076 \cdot 0.92 - ((664.815 - 57.35V') \cdot 0.9839) - 0.4132 \cdot 0.2293) / 0.0279$$

Donc $V' = 8.8542$ kmol/h et $S' = 157.0267$ kmol/h.

On porte les résultats dans les tableaux :

Constituants	Mi	Y'vi	Yvi	Quantité	
				Kg/h	Kmol/h
Ethylène	28.05	0.8572	0.8326	212.893	7.5898
isobutane	58.12	0.0279	0.0561	14.355	0.2470
Hexène	84.16	0	0	0	0
Azote	28.01	0.1147	0.1113	28.44	1.0155
Total	198.34	1	1		8.8542

Tableau 4.10-3: Composition et débit massique et molaire d'off- gaz

Constituants	Mi	X'si	XSi	Quantité	
				Kg/h	Kmol/h
Ethylène	28.05	0.0139	0.0068	61.401	2.189
Isobutane	58.12	0.98	0.9823	8979.29	154.4985
Hexène	84.16	0	0	0	0
Azote	28.01	0.0020	0.001	8.79514	0.314
Total	198.34	1	1	9049.48	157.0267

Tableau 4.10-4: Composition et débits massique et molaire du produit soutiré

La pureté de l'isobutane :

La fraction molaire de l'isobutane calculée est à **0.98**. Cela indique que près de **98%** du gaz récupéré au niveau du plateau de soutirage est de l'isobutane purifié.

Chapitre V : Calcul de vérification des paramètres de fonctionnement de la colonne de purification d'isobutane

Constituants	Mi	X' Ri	X Ri	Quantité	
				Kg/h	Kmol/h
Ethylène	28.05	0.159	0.0644	1.84	0.0656
Isobutane	58.12	0.229	0.1924	5.498	0.0946
Hexène	84.16	0.611	0.7432	21.24	0.2524
Azote	28.01	0	0	0	0
Total	198.34	1	1	28.578	0.4132

Tableau 4.10-5:Composition et débit massique et molaire du résidu.

	Entrée (Kmol/h)	Sorties (Kmol/h)
Alimentation	168.3076	/
Distillat	/	8.8542
Soutirage	/	157.0267
Résidu	/	0.4132
Total	168.3076	166.2941

Tableau 4.10-6:Bilan de matière de la colonne

4.11 Pression aux différentes zones de la colonne :

En partant de la température de bulle de reflux de colonne, la pression du ballon de reflux est déterminée par approximations successives, selon l'équation d'isotherme de la phase liquide :

$$\sum K_i X'_{,i} = I$$

Où **K_i** : constante d'équilibre du constituant à la pression et température fixée.

D'après le monogramme de **JENNY et SCHEIBEL**, les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Chapitre V : Calcul de vérification des paramètres de fonctionnement de la colonne de purification d'isobutane

Constituants	$X'_{Re, i}$	$T_{b,r} = 38 \text{ }^\circ\text{C}$ $P_{b,r} = 13.5 \text{ bars}$ K_i	$X'_{Re, i} \cdot K_i$
Ethylène	0.1433	3.9	0.5588
Isobutane	0.8542	0.44	0.3758
Hexène	0	0	0
Azote	0.0025	27.80	0.0695
Total	1		1.0041

Tableau 4.11-1: Pression du ballon de reflux.

Ce qui revient à dire que la pression du ballon est de **13.5 bars**.

En tenant compte des pertes de charge de la colonne jusqu'au ballon de reflux, la pression dans les différentes zones est calculée comme suit :

4.11.1 Pression au sommet de la colonne :

$$P_S = P_b + \Delta P_1$$

P_S : pression au sommet de la colonne.

ΔP_1 : pertes de charge dues aux résistances des conduites du condenseur 0.4-0.6 bars.

On prend : $\Delta P_1 = 0.4 \text{ bars}$, donc : $P_S = 13.5 + 0.4$

$$P_S = 13.9 \text{ bars.}$$

4.11.2 Pression au fond de la colonne :

$$P_F = P_S + \Delta P_2$$

ΔP_2 : pertes de charge dues aux résistances des plateaux 0.4-0.6 bars.

On prend : $\Delta P_2 = 0.5 \text{ bars}$, donc $P_F = 13.9 + 0.5$

$$P_F = 14.4 \text{ bars .}$$

4.11.3 Pression de la zone d'alimentation :

$$P_A = \frac{1}{2} (P_S + P_F) = 0, 5. (13.9+14,4)$$

$$P_A = 14, 15 \text{ bars.}$$

4.12 Températures aux différentes zones de la colonne :

Chapitre V : Calcul de vérification des paramètres de fonctionnement de la colonne de purification d'isobutane

4.12.1 Détermination de la température au fond de la colonne « température de bulle » :

La température au fond de la colonne à la pression $P_F = 14.4$ bars est déterminée par la méthode d'approximations successives en utilisant l'équation d'isotherme de la phase liquide :

$$\sum X'_i \cdot K_i = 1$$

Les résultats sont portés dans le tableau suivant :

Constituants	X'_{Ri}	$P_F = 14.4$ bars $T_F = 124^\circ\text{C}$ K_i	$X'_{Ri} \cdot K_i$
Ethylène	0.159	4.948	0.7867
Isobutane	0.229	0.6612	0.1514
Hexène	0.611	0.0995	0.06079
Azote	0	0	0
Total	1		0.9989

Tableau 4.12-1: Température au fond de la colonne.

Ce qui revient à dire que la température au fond de la colonne de purification est de 124°C .

4.12.2 Détermination de la température de soutirage :

Cette température correspond au point de bulle d'isobutane intermédiaire à une pression de 14.48 bars, $\sum X'_i \cdot K_i = 1$

Les résultats sont portés sur le tableau suivant :

Constituants	$X_{S,i}$	$P_{ST} = 14.48$ bars $T_{ST} = 78^\circ\text{C}$ K_i	$X'_{Ri} \cdot K_i$
Ethylène	0.0139	5.6	0.0778
Isobutane	0.9839	0.9	0.8855
Hexène	0	0	0
Azote	0.0020	20.19	0.04038
Total	1		1.003

Tableau 4.12-2: Température de soutirage.

Ce qui revient à dire que la température de soutirage est de 78°C .

Chapitre V : Calcul de vérification des paramètres de fonctionnement de la colonne de purification d'isobutane

4.12.3 Détermination de la température au sommet de la colonne « température de rosée » :

La température au sommet de la colonne à la pression du sommet (13.9 bars) est déterminée par approximations successives en utilisant l'équation d'isotherme de la phase vapeur.

$$\sum Y'_i / K_i = 1$$

Les résultats sont portés sur le tableau suivant :

Constituants	Y' _{v,i}	P _S =13.9 bars T _S =70 C° K _i	Y' _{D,i} / K _i
Ethylène	0.1869	5.4	0.0346
Isobutane	0.8029	0.81	0.9912
Hexène	0	0	0
Azote	0.01	21.89	0.0004
Total	1		1.02

Tableau 4.12-3: Température au sommet.

Ce qui revient à dire que la température au sommet de la colonne de purification est de **70°C**.

4.13 Bilan thermique de la colonne de purification :

Quantité de la chaleur entrante = Quantité de la chaleur sortante

L'établissement du bilan thermique de la colonne est nécessaire pour vérifier le débit du reflux liquide provenant de condenseur et pour déterminer les charges thermiques du condenseur et du rebouilleur.

$$Q_L + Q_{Rb} = Q_D + Q_S + Q_R + Q_C$$

$$Q_L = L' \cdot h_L \text{ « } e'_{\theta} = 1 \text{ »}$$

$$Q_R = R' \cdot h_R$$

$$Q_D = V' \cdot H_D$$

Avec :

Q_D: charge thermique de distillat Kcal/h

Q_L: charge thermique de l'alimentation Kcal/h

Q_R: charge thermique de résidu Kcal/h

Q_S: charge thermique de soutirage Kcal/h

Chapitre V : Calcul de vérification des paramètres de fonctionnement de la colonne de purification d'isobutane

Q_C : charge thermique de condenseur de la tête de la colonne de purification Kcal/h

Q_{Rb} : charge thermique fournie par le rebouilleur Kcal/h

H_L : enthalpie de la charge vapeur Kcal/Kmol

e'_0 : taux de vaporisation de la charge

h_R : enthalpie de résidu en état liquide Kcal/Kmol

H_R : enthalpie de la phase vapeur provenant de rebouilleur Kcal/Kmol

g_x : débit du reflux Kmol/h

h_x : enthalpie de reflux en état liquide Kcal/Kmol

H_v : enthalpie de vapeur provenant de sommet de la colonne de purification en état vapeur Kcal/Kmol

(r_b) : taux de rebouillage

L', S', R', V' : sont les débits molaires respectivement de la charge, de produit soutiré du résidu et de gaz de tête.

- **Calcul des volatilités relatives :**

La volatilité relative est calculée par l'équation suivante :

$$\alpha_i = K_i / K_r$$

On admet le constituant clé lourd IC4 : $\alpha_{C2} = K_{C2} / K_{IC4} = 1.7992$

- **Calcul de taux de vaporisation de la charge :**

Le taux de vaporisation de l'alimentation à l'entrée de la colonne est calculé par approximations successives en utilisant la formule : $\sum X'_{L,i} / (1 + e'_0(k'_i - 1)) = 1$

Résultat : $e'_0 = 0.121$.

- **Calcul du taux de reflux minimal :**

Le taux de reflux minimal est calculé par la formule de « Under Wood » :

$$[Rf]_{min} = \varphi \sum Y'_{D,i} / \alpha_{L,i} - \varphi$$

φ : la constante d'Under Wood. Elle est déterminée par le calcul approximatif suivant :

$$e'_0 = \sum \frac{\alpha_{i,L} X'_{L,i}}{\alpha_{i,L} - \varphi}$$

Pour $e'_0 = 0.121$, On trouve : $\varphi = 1.9334$

Donc : $[Rf]_{min} = 14.7739$.

Chapitre V : Calcul de vérification des paramètres de fonctionnement de la colonne de purification d'isobutane

- Calcul du taux de reflux optimal :

Le taux de reflux optimal : $[Rf]_{opt} = 1,3 [Rf]_{min} + 0,03$

$$[Rf]_{opt} = 19.2361.$$

- Calcul du taux de rebouillage minimal :

Le taux de rebouillage est calculé par la formule suivantes :

$$[Rb]_{min} = \sum X'_{Ri} \alpha_{Li} / \alpha_{Li} - \varphi$$

$$[Rb]_{min} = 1.6914$$

- Calcul du taux de rebouillage optimale :

Le taux de rebouillage optimal : $[Rb]_{opt} = [D' / R' [Rf]_{opt} + (1 - \bar{\epsilon}) / R' - 1]$

$$[Rb]_{opt} = 18.19$$

Tous les résultats obtenus sont dans le tableau suivant :

Constituant	$\alpha_{L,i}$	$X'_{L,i} / (1 + e^{-\theta} (k'_{i-1}))$	$\frac{\alpha_{i,L} X'_{L,i}}{\alpha_{i,L} - \varphi}$	$Y'_{Di} / \alpha_{Li} - \varphi$	$X'_{Ri} \alpha_{Li} / \alpha_{Li} - \varphi$
Ethylène	1.7992	0.00025	0.00007	0.1873	1.2538
Isobutane	23.31	0.57100	0.591	0.0392	0.5987
Hexène	1	0.43050	-0.46998	0.0001	-0.1611
Azote	40.1	0.00032	-0.00009	7.4149	0
Total	-	1	0.121	7.6415	1.6914

Tableau 4.13-1: Tableau des résultats de calcul.

!

Chapitre V : Calcul de vérification des paramètres de fonctionnement de la colonne de purification d'isobutane

4.13.1 Calcul des charges thermiques :

- **Charge thermique de l'alimentation Q_L :**

$$Q_L = L' \cdot h_L$$

$$h_L = \epsilon_0 \cdot H_0 + (1 - \epsilon_0) \cdot h_0 = 27270 \text{ kcal/Kmole}$$

$$Q_L = 168.3076 \cdot (27270)$$

$$Q_L = 4589868.24 \text{ Kcal / h}$$

- **Charge thermique de distillat Q_D :**

$$Q_D = V' \cdot H_D$$

$$H_D = C_p \cdot \Delta T = 22950 \text{ Kcal / Kmole}$$

$$Q_D = (8.8542) \cdot 22950$$

$$Q_D = 203203.89 \text{ Kcal/h}$$

- **Charge thermique de soutirage Q_S :**

$$Q_S = S' \cdot h_S = S' \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$Q_S = 157.0267 \cdot (34250)$$

$$Q_S = 5378164.47 \text{ Kcal / h}$$

- **Charge thermique de résidu Q_R :**

$$Q_R = R' \cdot h_R = R' \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$Q_R = 0.4132 \cdot (16050)$$

$$Q_R = 6631.86 \text{ Kcal / h}$$

- **Charge thermique de condenseur Q_C :**

$$Q_{Con} = (D + g_x) \cdot (H_D - h_D) \text{ avec } g_x = 171.2 \text{ kmol / h}$$

$$= 267556.21 \text{ Kcal / h}$$

- **Charge thermique fournie par le rebouilleur Q_{Rb} :**

$$Q_{Rb} = Q_R + Q_D + Q_C + Q_S - Q_L$$

$$Q_{Rb} = 6631.86 + 203203.89 + 267556.21 + 5378164.47 - 4589868.24$$

$$Q_{Rb} = 1265688.19 \text{ Kcal/h}$$

Chapitre V : Calcul de vérification des paramètres de fonctionnement de la colonne de purification d'isobutane

4.14 Calcul de nombre de plateaux :

4.14.1 Dans la zone de rectification (méthode approximative de Gilliland) :

Le nombre de plateaux théorique dans la zone de rectification est donné par l'équation suivante :

$$N_{Rmin} = \frac{\ln [Y'_{D,C2} \cdot X'_{LIC4} / Y'_{D,IC4} \cdot X'_{L,C2}]}{\ln (\alpha_{RmC2} / \alpha_{RmC2})}$$

$$N_{Rmin} = 7$$

On utilise le diagramme de **Gilliland** qui donne la relation entre le nombre de plateaux théorique et le taux de reflux :

$$(N_R - N_{Rmin}) / (N_R + 1) = ([Rf]_{opt} - [Rf]_{min}) / ([Rf]_{opt} + 1)$$

$$(N_R - N_{Rmin}) / (N_R + 1) = 0.6$$

$$N_R = 10$$

Donc : $N_{réel} = N_R / E$

$$N_{réel} = 10 / 0.6$$

$$N_{réel} = 17$$

4.14.2 Dans la zone d'épuisement (méthode approximative de Gilliland) :

$$N_{Emin} = \frac{\log [(X'_{L,C2} \cdot X'_{R,IC4}) / (X'_{L,IC4} \cdot X'_{R,C2})]}{\ln (\alpha_{EmC2} / \alpha_{EmIC4})}$$

$$N_{Emin} = 3$$

Et on a :

$$(N_E - N_{Emin}) / (N_E + 1) = 0.6$$

$$N_E = 7.69$$

Avec :

$$N_{réel} = N_E / E = 7.69 / 0.60$$

$$N_{réel} = 13$$

Le nombre de plateaux total sera : $N_{total} = 30$.

Les calculs indiquent que la colonne de purification nécessite 30 plateaux pour atteindre la pureté souhaitée de l'isobutane, comparé aux 34 plateaux prévus dans le design initiale. La nécessité de seulement 30 plateaux par rapport aux 34 prévus dans le design initial montre que la colonne de purification de l'isobutane au complexe CP2K fonctionne de manière efficace et optimisée.

Chapitre V : Calcul de vérification des paramètres de fonctionnement de la colonne de purification d'isobutane

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons calculé le bilan de matière pour évaluer les flux entrants et sortants, ainsi que les compositions massique et molaire à différentes sections de la colonne. En outre, nous avons déterminé les températures et pressions dans les différentes zones de la colonne, essentielles pour comprendre les conditions de fonctionnement de chaque section. De plus, nous avons effectué un bilan thermique pour évaluer la charge thermique du rebouilleur. Enfin, nous avons déterminé le nombre de plateaux nécessaire pour assurer une séparation efficace des composants dans la colonne. L'ensemble de ces calculs nous a fourni des informations cruciales pour optimiser le fonctionnement de la colonne de distillation et garantir la qualité du produit final.

Chapitre VI : Simulation et Interprétation des résultats

Introduction :

Pour évaluer ces conditions de fonctionnement à des débits différents de celui du design initial, des calculs ont été effectués pour déterminer les nouvelles conditions optimales. Afin de confirmer l'exactitude de ces calculs, une simulation a été réalisée. Cette simulation a permis de valider les résultats obtenus et d'assurer que les nouvelles conditions proposées permettent de maintenir la pureté élevée de l'isobutane recyclé.

Ce chapitre présente les résultats de la simulation et compare ces résultats avec les conditions de fonctionnement en cas de design. Nous analysons les ajustements nécessaires pour optimiser la performance de la colonne de purification en fonction des débits réels.

5.1 Principes de fonctionnement et rôle des simulateurs

Les simulateurs de procédés utilisés classiquement dans l'industrie, peuvent être considérés comme des modèles de connaissance. Ils sont basés sur la résolution de bilans de masse et d'énergie, des équations d'équilibres thermodynamiques, ... et sont à même de fournir l'information de base pour la conception. Ils sont principalement utilisés pour la conception de nouveaux procédés (dimensionnement d'appareil, analyse du fonctionnement pour différentes conditions opératoires, optimisation), pour l'optimisation de procédés existants et l'évaluation de changements effectués sur les conditions opératoires. Avant même de parler de modèles d'opération de transformation de la matière, il faut des modèles pour prédire les propriétés physiques de la matière. C'est pourquoi ces simulateurs disposent tous d'une base de données thermodynamiques contenant les propriétés des corps purs (masse molaire, température d'ébullition sous conditions normales, paramètres des lois de tension de vapeur...). Cette base de données est enrichie d'un ensemble de modèles thermodynamiques permettant d'estimer les propriétés des mélanges.

Tout simulateur industriel de procédés chimiques est organisé autour des modules suivants :

- Une base de données des corps purs et un ensemble de méthodes pour estimer les propriétés des mélanges appelés aussi modèles thermodynamiques.
- Un schéma de procédé permettant de décrire les liaisons entre les différentes opérations unitaires constituant l'unité (PFD pour Process Flow Diagram).
- Des modules de calcul des différentes opérations unitaires contenant les équations relatives à leur fonctionnement : réacteur chimique, colonne de distillation, colonne de séparation, échangeurs de chaleur, pertes de charges, etc.

Un ensemble de méthodes numériques de résolution des équations des modèles. Avec ce type de logiciel, les ingénieurs peuvent à partir de la donnée des corps purs présents dans le procédé et du schéma de procédé, développer un modèle du processus reposant sur la mise en commun des équations décrivant les différentes opérations unitaires, les réactions chimiques, les propriétés des substances et des mélanges, qui puisse aussi communiquer avec d'autres applications comme Excel, Visual Basic et Matlab.

5.2 Le choix du modèle thermodynamique :

Les logiciels de simulation donnent accès à plusieurs modèles thermodynamiques pour la prédiction de l'équilibre liquide vapeur, d'enthalpie et d'entropie ainsi que les propriétés de transports. La réussite de la simulation dépend du choix du modèle thermodynamique, parce que ce dernier est établi pour une classe de fluide et un domaine de conditions P et T recommandés en utilisant des hypothèses et des suppositions pratiques.

On peut distinguer :

Modèles d'activité :

Ces modèles sont surtout utilisés pour les systèmes qui présentent une forte polarité. Parmi ces modèles : le modèle de MARGULES et le modèle UNIQUAC.

Modèles hétérogènes :

Ces modèles sont recommandés pour les systèmes de constituants présentant une forte polarité (forte déviation à l'idéalité, azéotropiques). Dans ces modèles les phases vapeurs sont représentées par les équations d'états, et les phases liquides par des corrélations pour le calcul des coefficients de fugacité. Leurs utilisations restent limitées à cause de la nature empirique des corrélations proposées et qui nécessitent des extrapolations en dehors des conditions expérimentales.

Modèles basés sur les équations d'état : Les modèles thermodynamiques basés sur les équations d'état sont utilisés pour le calcul des systèmes d'hydrocarbure et des systèmes de faible non idéalité. Ils peuvent être utilisés pour calculer des propriétés thermodynamiques telle que : la constante d'équilibre K, l'entropie, l'enthalpie et la densité. Leurs supériorités par rapport aux autres modèles résident dans le fait de l'utilisation des coefficients d'interaction binaires.

Equations d'état usuelles : Les modèles basés sur les équations d'état (RK, SRK, PR, ...) ; sont souvent utilisés pour le calcul des systèmes d'hydrocarbures et des systèmes presque idéaux. Leurs avantages par rapport aux autres modèles résident dans le fait de l'utilisation des coefficients d'interaction-binaire. En générale les équations d'état permettent de calculer l'ensemble des propriétés des produits par rapport à la température et aux fractions molaire.

Equation de PENG-ROBINSON : L'équation de PENG-ROBINSON diffère de l'équation de SOAVE par l'expression du terme d'attraction. Elle a été introduite en vue d'améliorer les résultats obtenus par l'équation de SOAVE notamment en ce qui concerne le calcul des densités en phase liquide, sans modifier nombre de paramètre :

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V-b)+b(V-b)}$$

Les termes a(T) et b sont définis comme suit :

$$a = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c^2} a(T_R)$$

Le terme $a(T_R)$ présente la même forme générale que dans le cas de l'équation de SOAVE

$$a(T_R)=[1 + m(1 - \sqrt{TR})]^2$$

Mais la fonction reliant le paramètre m au facteur acentrique ω est différente :

$$m=0.37464 \omega+1.54226-0.26992 \omega^2$$

Ces équations sont très largement utilisées dans les modèles de simulation, en production et traitement de gaz. L'équation la plus recommandée pour les systèmes d'hydrocarbures est l'équation de PENG-ROBINSON, car elle résout accord avec les valeurs réelles que les autres équations.

5.3 Schéma de simulation de la colonne de purification de l'isobutane :

Voici le schéma de simulation utilisé pour évaluer les conditions de fonctionnement de la colonne de purification de l'isobutane :

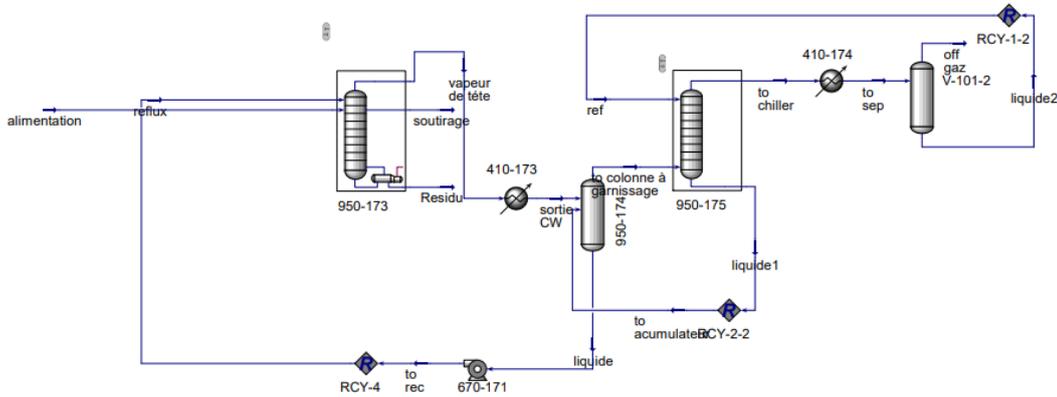


Figure 14: Schéma de simulation de la colonne de purification de l'isobutane

5.4 Confirmation des résultats par simulation :

Pour confirmer les résultats obtenus manuellement, nous avons utilisé HYSYS pour simuler les conditions de fonctionnement de la colonne de purification de l'isobutane. La simulation a permis de valider les calculs et d'assurer l'exactitude des nouvelles conditions de fonctionnement.

Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus à partir de la simulation HYSYS :

Nom	Reflux	Alimentation	Vapeur de tête	Soutirage	Résidu
Débit molaire(kmol/h)	174.03	168.60	1756.6	157.36	0.6619
Température [C]	38,06	102,00	70,45	78,76	124,00
Pression [bar]	14,20	14,40	14,15	14,51	14,65
Pureté de l'isobutane de recyclage	98%				

La simulation HYSYS a montré que la fraction de l'isobutane soutiré au niveau du plateau de soutirage est de 0.98. Cela signifie que l'isobutane de recyclage présente une pureté de 98%.

Conditions de fonctionnement en cas design :

Dans le cadre de la conception initiale de la colonne de purification de l'isobutane au complexe CP2K, celle-ci est conçue pour fonctionner avec des paramètres bien définis afin d'assurer une purification optimale. La colonne, équipée de 34 plateaux, vise à séparer les gaz provenant de la chambre de flash et à récupérer l'isobutane recyclé avec une pureté élevée. Les conditions de fonctionnement en cas de design incluent des débits spécifiques, des températures et pressions de fonctionnement précises, ainsi que des objectifs de pureté rigoureux pour l'isobutane recyclé. Les tableaux ci-dessous détaillent ces conditions de fonctionnement :

	Reflux	Alimentation	Vapeur de tête	Soutirage	Résidu
Débit molaire	345.59	278.23	383.223	240.18	0.425
Température [C]	37,78	102,44	68,08	82,69	141,05
Pression [bar]	13,85	14,98	14,20	14,35	14,40
Pureté de l'isobutane de recyclage	96%				

La simulation HYSYS a montré que la fraction de l'isobutane soutiré au niveau du plateau de soutirage est de 0.96. Cela signifie que l'isobutane de recyclage présente une pureté de **96%**.

Interprétation des résultats :

Les résultats de la simulation HYSYS ont été comparés à ceux calculés pour évaluer la cohérence entre les deux méthodes. Il est notable que les résultats présentent une similitude frappante, avec une fraction d'isobutane évaluée à environ **98%** dans les deux cas. Cette correspondance presque parfaite confirme la fiabilité des nouvelles conditions de fonctionnement proposées pour la colonne de purification de l'isobutane au complexe CP2K, garantissant ainsi une pureté élevée du produit final.

Pour bien comprendre la portée de ces résultats, il est utile de les comparer aux conditions de design initiales de la colonne de purification.

L'obtention d'une pureté de **98%** pour l'isobutane, comparée à une pureté de **96%** dans le design initial, montre que les deux produisent une pureté élevée, ce qui est le plus crucial pour le processus de recyclage.

Toutefois, malgré cette pureté élevée dans les deux cas, la différence observée doit être évaluée attentivement. Lors de l'évaluation des résultats de mes calculs par rapport aux valeurs du design, plusieurs observations importantes ont été faites.

Bien qu'il n'y ait pas de grande différence entre les valeurs calculées et celles du design alors que le débit de la colonne a changé, certaines variations significatives ont été notées dans les paramètres de fonctionnement.

- Bien qu'il n'y ait pas de grande différence entre les valeurs calculées et celles du design alors que le débit de la colonne a changé, certaines variations significatives ont été notées dans les paramètres de fonctionnement, notamment les températures et les pressions au niveau du soutirage et des résidus. La température de soutirage et de résidu a diminué respectivement de **83°C** jusqu'à **78,76°C** et de **141°C** jusqu'à **124,00°C**. La pression de soutirage et de résidu a augmenté respectivement de **14,06 bars** jusqu'à **14,51 bars** et de **14,12 bars** jusqu'à **14,65 bars**.

La diminution de la température au niveau du soutirage et des résidus pourrait améliorer la séparation des composants. Une température plus basse peut réduire la volatilité des impuretés, facilitant leur séparation et augmentant ainsi la pureté de l'isobutane.

Une légère augmentation de la pression peut également affecter la pureté de l'isobutane. Une pression plus élevée peut améliorer l'efficacité de la séparation en augmentant la différence de point d'ébullition entre l'isobutane et les autres composants présents.

- Dans le design initial, la présence de composants traces tels que l'hexane, le butane, le propane et l'hydrogène a été prise en compte. Ces impuretés peuvent provenir de différentes sources, notamment l'utilisation d'un autre catalyseur ou la production de sous-produits lors du chauffage. La présence de ces composants traces peut compliquer le processus de purification et affecter la pureté finale de l'isobutane récupéré. Cependant, dans mon étude, je n'ai pas pris en compte ces impuretés, ce qui peut expliquer la différence entre la pureté obtenue et celle spécifiée dans le design initial.

Conclusion

En conclusion, la comparaison des résultats obtenus par simulation et par calcul manuel avec les conditions de design initiales montre que les objectifs de pureté élevée et de stabilité des conditions de fonctionnement ont été atteints avec succès. La colonne de purification de l'isobutane au complexe CP2K fonctionne de manière efficace et fiable, même avec des débits variables, tout en maintenant une pureté d'isobutane de 98%. Cette performance qui semble améliorée par rapport aux conditions de design initiales de 96% soulignent l'importance de contrôler précisément les paramètres de fonctionnement pour garantir la qualité et l'efficacité du recyclage de l'isobutane.

Conclusion générale

Ce mémoire a porté sur l'étude de la colonne de purification de l'isobutane au sein du complexe CP2K, avec pour objectif principal la détermination des paramètres de fonctionnement optimaux afin d'assurer une pureté élevée de l'isobutane recyclé.

Pour atteindre ces objectifs, une série de calculs manuels et de simulations utilisant HYSYS ont été réalisés. Ces travaux ont permis de confirmer que, malgré les variations des débits par rapport aux conditions de design initiales, la colonne de purification peut maintenir des conditions de fonctionnement stables. Les résultats obtenus montrent une pureté de l'isobutane soutiré atteignant **98%**, dépassant ainsi la pureté de **96%** prévue dans les conditions de design.

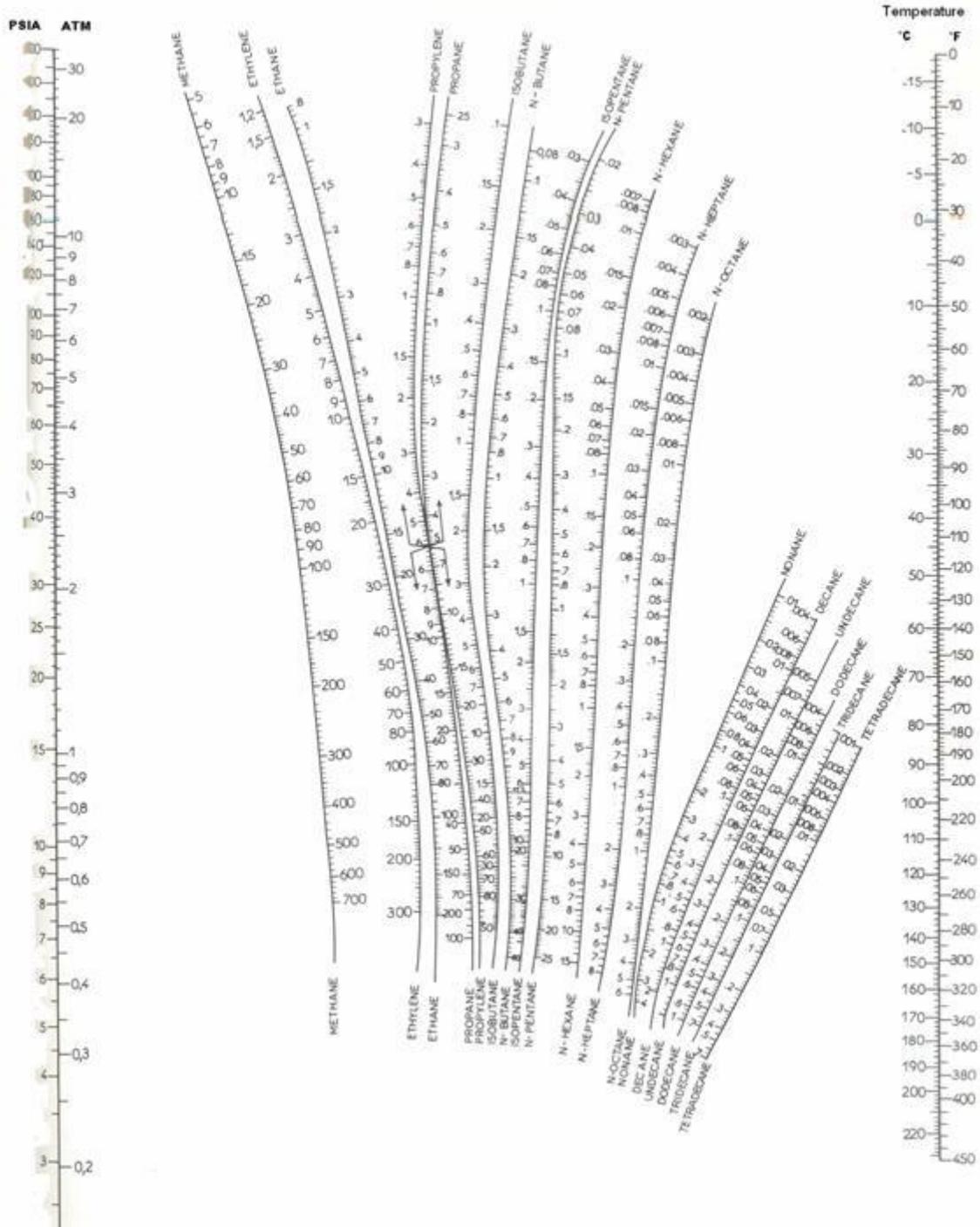
En outre, le stage effectué au complexe CP2K a été extrêmement bénéfique. Il m'a permis de comprendre en profondeur les opérations et les défis pratiques liés à la purification de l'isobutane. L'accès aux données réelles et la possibilité d'interagir avec les professionnels de l'industrie ont enrichi mon apprentissage et ont été essentiels pour la réussite de ce projet.

En résumé, les objectifs fixés au début de cette étude ont été pleinement atteints. Les paramètres de fonctionnement optimaux de la colonne de purification ont été déterminés avec précision, et une pureté élevée de l'isobutane de recyclage a été réalisée.

Ce travail fournit ainsi des bases solides pour l'amélioration continue des opérations de purification au sein du complexe, contribuant à une meilleure efficacité et une qualité supérieure des produits issus du processus de production. Le stage au CP2K a été une expérience enrichissante qui a grandement facilité l'accomplissement de cette étude et a approfondi ma compréhension des processus industriels complexes.

ANNEXE :

Nomogramme des coefficients d'équilibre (K_i) des hydrocarbures (Scheibel et Jenny)



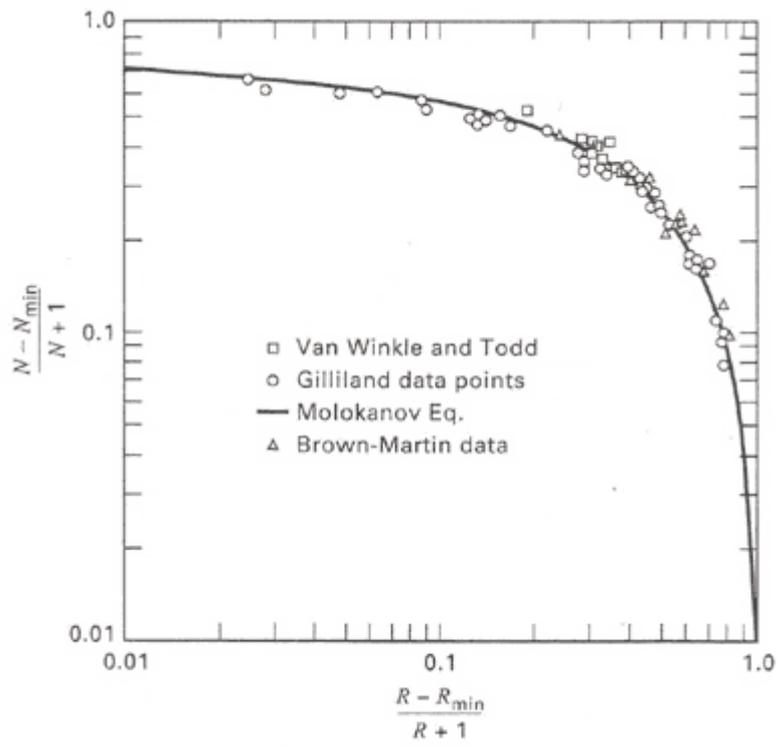


Diagramme de GELLILLAND

Bibliographie

- [1] [Procédé de polymérisation — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)
- [2] [Dossiers - StudySmarter](#)
- [3] [Chapitre I Généralités sur les polymères \(univ-biskra.dz\)](#)
- [4] [Polyéthylène | Formule, propriétés et application \(material-properties.org\)](#)
- [5] [5. Schematic representation of polyethylene classes and corresponding... | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)
- [6] <https://www.dow.com/en-us/product-technology/pt-polyethylene.html>
- [7] [mémoire 2019.pdf \(univ-guelma.dz\)](#)
- [8] <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2018/10/Maidi-Abderrahmene.pdf>
- [9] [La Polymérisation | Lamine BENBOUZID - Academia.edu](#)
- [10] [Dossiers - StudySmarter](#)
- [11] <file:///C:/Users/Hp/Downloads/coursdistillation.pdf>
- [12] https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/13045/1/BOURBOUNA_SAFI_F1.pdf
- [13] Brochure FHC : THEORIE ET CALCUL DE LA RECTIFICATION DES MELANGES COMPLEXES
- [14] P. WUITHIER : Le pétrole, Raffinage et Génie chimie, Tome I, Deuxième édition
- [15] Technip ; Paris 1972
- [16] Manuel opératoire de l'Unité de Polymed ; Skikda, 2017.
- [17] P. WUITHIER : Le pétrole, Raffinage et Génie chimie, Tome I, Deuxième édition
- [18] [A3315.fm \(univ-eloued.dz\)](#)