

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE 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

BOUMACHOUENE Imene

Et

KANOUNE Sabrina

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Génie des Procédés : Raffinage

**Étude du fonctionnement de la colonne de
désulfuration des GPL C-203601 en utilisant
différents types d'amine (MEA, DEA et MDEA) au
niveau de la raffinerie d'Adrar.**

Devant le jury :

Mme. BENMEBROUKA Hafsa	MCB	UMBB	Président
Mme. BOUCHEMEL Hassiba	MCB	UMBB	Examineur
Mme. BEDDA Kahina	MCA	UMBB	Encadrant

Année Universitaire : 2023/2024

Résumé

Le GPL obtenu par les procédés de craquage catalytique et de distillation atmosphérique à la raffinerie d'Adrar RA1D contient du H₂S en tant qu'impureté, ce qui pose des défis opérationnels significatifs et nécessite la mise en œuvre d'un procédé de désulfuration. Ce mémoire se consacre à une étude de la colonne de désulfuration du GPL, identifiée sous la référence C203-601, en employant trois types distincts de solvants à base d'amine (monoéthanolamine, diéthanolamine et méthyl-diéthanolamine). Nous examinons en détail l'influence de divers paramètres opératoires, la température et la concentration d'amine dans le solvant. L'objectif de cette recherche est d'évaluer la performance et l'efficacité de chaque solvant dans le processus de désulfuration, en utilisant le simulateur HYSYS, afin de produire un GPL répondant aux standards internationaux de qualité.

Abstract

LPG obtained through catalytic cracking and atmospheric distillation at Adar RA1D's refinery contains H₂S as impurities, which poses significant operational challenges and requires the implementation of a desulfurization process. This paper is devoted to a study of the desulfurization column of LPG, identified under reference C203-601, using three distinct types of amine-based solvents (monoethanolamine, diethanolamine and methyldiethanolamine). We examine in detail the influence of various operating parameters, temperature and concentration of amine in the solvent. The aim of this research is to evaluate the performance and effectiveness of each solvent in the desulfurization process, using the HYSYS simulator, in order to produce a GPL that meets international quality standards.

ملخص

يحتوي غاز البترول المميع المستخلص من عمليات التكسير التحفيزي والتقطير الجوي في مصفاة أدرار RA1D على H₂S كشائبة، مما يشكل تحديات تشغيلية كبيرة ويتطلب تنفيذ عملية إزالة الكبريت. تركز هذه الأطروحة على دراسة عمود إزالة الكبريت من غاز البترول المميع، الذي تم تحديده باسم C203-601، باستخدام ثلاثة أنواع متميزة من المذيبات الأمينية (أحادي الإيثانول أمين، وثنائي الإيثانول أمين، وميثيل ثنائي الإيثانول أمين). ندرس بالتفصيل تأثير معاملات التشغيل المختلفة، وهي درجة الحرارة وتركيز الأمين في المذيب. والهدف من هذا البحث هو تقييم أداء وكفاءة كل مذيب في عملية إزالة الكبريت، باستخدام محاكي HYSYS، من أجل إنتاج غاز البترول المميع الذي يلبي معايير الجودة العالمية.

Dédicace

À *Ma Mère,*

Je vous exprime ma plus profonde reconnaissance pour être le pilier inébranlable de ma vie, le puits de mes secrets et mon refuge le plus sûr. Votre amour inconditionnel, votre soutien infatigable et vos innombrables sacrifices ont été les fondations sur lesquelles repose ma réussite. Vous m'avez inculqué la persévérance, la résilience et la foi en moi-même. Votre dévouement et votre tendresse ont illuminé chaque étape de ce chemin. Vous êtes tout pour moi, et ce mémoire est dédié à votre extraordinaire influence sur ma vie.

À *Mon Père,*

Je vous dédie ce mémoire en hommage à l'inspiration constante que vous représentez pour moi. Vous avez été le premier à me donner le courage et la confiance nécessaires pour surmonter chaque obstacle de mon parcours. Votre soutien inébranlable et vos conseils éclairés ont été des phares dans les moments de doute. Vous avez su m'insuffler la force et la détermination indispensables pour atteindre mes objectifs. Recevez toute ma gratitude pour votre présence indéfectible et votre foi en mes capacités.

À *mon frère Riadh,*

Pour ta présence indéfectible et ton soutien constant. Ta compréhension, ta patience et tes encouragements ont été essentiels pour surmonter les défis rencontrés en cours de route. Merci pour les éclats de rire et les moments de complicité qui ont apporté de la lumière et de la joie à mon parcours. Reçois toute ma gratitude pour ta fraternité exemplaire et ton appui inébranlable.

À *mon amie d'enfance et binôme Imene,*

Pour ces dix-sept années d'amitié fidèle et de collaboration harmonieuse. Ta loyauté, ton engagement et ton soutien ont été cruciaux dans la réalisation de ce mémoire. Ta présence à mes côtés, à travers les hauts et les bas, a été une source constante de force et d'inspiration. Reçois l'expression de ma gratitude la plus profonde pour ton amitié inébranlable et ta collaboration précieuse.

À *mes cousines Amel et Wafaa,*

Pour votre affection sincère et votre soutien sans faille. Vos encouragements constants et votre aide précieuse ont été des sources inestimables de motivation et de réconfort. Merci pour votre présence chaleureuse et votre soutien indéfectible tout au long de cette aventure académique. Votre bienveillance et votre amitié ont été des piliers importants de ma réussite.

Sabrina.

Dédicace

À *Ma Mère*, mon premier soutien.

Ta présence et ton amour inconditionnel ont pavé la voie de mon succès. Tu es celle qui m'a toujours guidé avec tendresse et patience, nourrissant mes rêves et apaisant mes doutes. Grâce à toi, chaque ambition est devenue réalité, car, tu m'as toujours donné le courage d'avancer. Je te suis infiniment reconnaissante pour tout ce que tu as sacrifié pour moi. Tes conseils avisés ont été essentiels à chaque moment de ma vie. Tu es bien plus qu'une mère, tu es mon inspiration, mon modèle et ma source d'énergie. Je t'admire profondément pour ta force et ta persévérance.

À *Mon Père*,

Ta confiance et tes sacrifices m'ont permis d'être là aujourd'hui. Ta foi en moi et ton dévouement sans faille ont été les piliers de mes réalisations. Tes conseils, ton encouragement constant et ton soutien inconditionnel a été mes plus grands atouts dans la vie. Cette réussite est le reflet de tout ce que tu m'as apportée. Ta présence bienveillante est un trésor pour moi. Je suis profondément reconnaissante pour tout ce que tu as fait pour moi.

À ma sœur *Bouchra* et son mari *Youcef*,

Ta présence réconfortante, ainsi que celle de ton mari qui est désormais aussi un frère pour moi, sont une vraie richesse. Votre force et votre soutien constants m'ont permis d'avancer avec assurance. Merci à vous deux pour votre amour et votre soutien qui ont une valeur inestimable pour moi.

À mon frère *Mohamed*,

Tu es la source de ma joie et de mon réconfort. Ta capacité à remonter mon moral et ton soutien à chaque étape de mon parcours sont inestimables. Ta bonne humeur et ta présence à mes côtés, toujours prêt à m'encourager, m'ont été une force. Merci pour ton optimisme contagieux.

À mon frère *Rafik*,

Pour tes encouragements et ton aide précieuse. Tu as toujours su m'apporter ton soutien au moment où j'en avais le plus besoin. Tu as toujours su trouver les mots justes pour me donner le courage de continuer. Ta générosité, ta présence bienveillante et ton soutien sans faille ont été essentielle pour moi.

À petit mon frère *Farouk*,

Notre rayon de soleil, tu es celle qui illumine nos vies d'une façon unique et inoubliable. Ta bonté et ton soutien infini ont été une source de bonheur et de motivation pour moi. Ton amour et ta présence me donnent la force de continuer. Merci pour ta lumière et ton aide précieuse.

À ma 2^{ème} sœur *Sabrin*,

Mon amie d'enfance, tu as été à mes côtés, dans les bons et les mauvais moments. Je suis immensément chanceuse de t'avoir comme binôme et d'avoir partagé tant de souvenirs avec toi. Ta générosité, ton soutien et ton aide précieuse, non seulement pour ce travail mais dans tous les aspects de ma vie, me touchent profondément. Je te remercie infiniment, ainsi que toute ta famille. J'ai l'honneur d'avoir une deuxième famille aussi merveilleuse que la vôtre.

À toute *Ma Famille*,

Chacun d'entre vous, mes chers tantes, oncles, cousines et cousins, a joué un rôle crucial dans ma vie, m'encourageant à chaque étape du chemin et me montrant ce qu'est la vraie solidarité familiale. Je souhaite prendre un moment pour vous remercier du fond du cœur pour votre soutien et votre générosité.

Imene.

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions **Dieu**, le Tout-Puissant, qui nous a accordé de la force, la sagesse et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce mémoire. Sa bienveillance et sa miséricorde nous ont accompagnés tout au long de ce parcours, et nous Lui sommes profondément reconnaissants.

Nous tenons également adresser nos sincères remerciements à **Mme K. BEDDA** pour son encadrement précieux et son soutien indéfectible. Ses conseils avisés, sa disponibilité constante et le temps qu'elle nous a généreusement consacré ont été une source d'inspiration et ont grandement contribué à la réussite de ce travail. Grâce à son expérience riche et sa rigueur académique, elle a su nous guider et nous encourager à donner le meilleur de nous-mêmes.

Nous souhaitons aussi exprimer notre profonde reconnaissance à tous les **professeurs du département Génie des procédés chimiques et pharmaceutiques** qui ont chacun, par leur enseignement et leur dévouement, ajouté leur touche à notre parcours universitaire pendant ces cinq années d'études.

Nous tenons aussi à exprimer notre reconnaissance à l'ensemble **du personnel de la raffinerie d'Adrar RA1D** où nous avons eu l'opportunité d'effectuer notre stage pratique. Leur accueil chaleureux et leur professionnalisme ont été déterminants dans l'acquisition de nouvelles compétences. Un remerciement tout particulier à **M. MEHDJABI**, pour sa patience, son expertise et son accompagnement précieux tout au long de cette expérience enrichissante.

Nous souhaitons également exprimer notre profonde gratitude aux **membres du jury** pour avoir accepté de juger notre travail et pour le temps précieux qu'ils nous ont consacré.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre gratitude à **nos collègues d'études** pour les échanges fructueux que nous avons partagés ont rendu ce parcours académique plus enrichissant et agréable.

Nous exprimons nos remerciements les plus sincères à tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce travail. Nous leur sommes profondément reconnaissantes pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants.

Abréviations

RA1D : Raffinerie aval 1 Adrar.

CNPC : China National Petroleum Corporation.

SONATRACH : Société Nationale pour la Recherche, la Production, et la Commercialisation des Hydrocarbures.

CPF : Centre de traitement de brut.

Tonnes/an : Tonnes par an.

g/l : Gramme par litre.

CDU : Unité de distillation atmosphérique.

GPL : Gaz du pétrole liquéfié.

RFCC : Residu Fluid Catalytic Cracking.

CRU : Unité de reformage catalytique.

NO : Indice d'octane.

DCS : Système de contrôle.

PPU : Unité de purification d'azote.

MT : Moyenne tension.

Kg/l : kilogramme par litre.

PCI : Pouvoir calorifique inférieur.

PCS : Pouvoir calorifique supérieur.

Kcal/kg : kilocalorie par kilogramme.

RON : Indice d'octane recherché.

MON : Indice d'octane moteur.

H₂S : Sulfure d'hydrogène.

SO₂ : Dioxyde de soufre.

GPL-C : Gaz du pétrole liquéfié carburant.

SO_x : Oxyde de soufre.

CO₂ : Dioxyde de carbone.

P_A : La pression partielle d'un composé A.

P_v : Pression de vapeur.

X_A : la fraction molaire en phase liquide du composé A.

P_A^* : Pression à l'équilibre du composé A.

H : Coefficient de la loi de Henry.

Φ_A : Flux spécifique d'absorption par unité d'aire interfaciale.

k_G : Coefficient de transfert dans le gaz.

k_L : Coefficient de transfert dans le liquide.

P_{Ai}^* : Pression partielle de A à l'interface à l'état d'équilibre.

C_A^* : Concentration en gaz dissous de A à l'état d'équilibre.

C_A : Concentration en gaz dissous de A.

P : Pression interne.

V : Volume molaire.

a, b : Constantes propres au corps pur.

R : Constante des gaz parfaits.

T_c : Température critique.

P_c : Pression critique.

Z_c : Facteur de compressibilité critique.

MEA : Monoéthanolamine.

DEA : Diéthanolamine.

MDEA : Méthyldiéthanolamine.

DIPA : Diisopropanolamine.

DGA : Amine éthoxyéthanol.

$_NH_2$: Groupement fonctionnel amine.

g/cm^3 : Gramme par centimètre cube.

$OH_$: Groupement hydroxyde.

COS : Sulfure de carbonyle.

MEROX : Oxydation des mercaptans.

GNL : Gaz naturel liquéfié.

Ppm : Partie par million.

Table des matières

Résume.....	I
Dédicace.....	II
Remerciements	V
Abréviations	VI
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE.I. PRÉSENTATION DE LA RAFFINERIE D'ADRAR.....	5
I.1. INTRODUCTION	6
I.2. HISTORIQUE DE LA RAFFINERIE RA1D.....	6
I.3. SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE LA RAFFINERIE D'ADRAR.....	7
I.4. L'ALIMENTATION DE LA RAFFINERIE RA1D	8
I.5. LA CAPACITÉ ANNUELLE DE TRAITEMENT ET DE PRODUCTION DE LA RAFFINERIE RA1D.....	9
I.5.1. <i>La capacité de traitement.....</i>	<i>9</i>
I.5.2. <i>La capacité de production.....</i>	<i>9</i>
I.6. LES UNITÉS DE PRODUCTION	10
I.6.1. <i>L'unité de distillation atmosphérique CDU (U201)</i>	<i>11</i>
I.6.2. <i>Unité de craquage catalytique RFCC (U203) :.....</i>	<i>12</i>
I.6.3. <i>L'unité de reforming catalytique CRU (U202)</i>	<i>13</i>
I.7. LES UTILITÉS DE LA RAFFINERIE RA1D.....	14
I.7.1. <i>Unité de traitement des eaux.....</i>	<i>15</i>
I.7.2. <i>Unité de production de vapeur (chaudière).....</i>	<i>16</i>
I.7.3. <i>Unité de production d'air comprimé</i>	<i>17</i>
I.7.4. <i>Tour de refroidissement.....</i>	<i>17</i>
I.7.5. <i>Unité de production et de distribution d'énergie électrique</i>	<i>18</i>
I.7.6. <i>Unité de traitement des eaux usées.....</i>	<i>19</i>
CHAPITRE.II. GÉNÉRALITÉS SUR LE GPL.....	20
II.1. INTRODUCTION	21
II.2. CARACTÉRISTIQUES ET PROPRIÉTÉS DU GPL	22
II.2.1. <i>Les principales propriétés du GPL.....</i>	<i>22</i>
II.2.2. <i>D'autres propriétés du GPL.....</i>	<i>25</i>
II.3. LES SOURCES DU GPL.....	26
II.3.1. <i>L'obtention du GPL à partir des champs gaziers</i>	<i>27</i>
II.3.2. <i>L'obtention du GPL à partir des raffineries</i>	<i>28</i>
II.3.2.1. <i>La production du GPL à partir du Topping</i>	<i>28</i>

II.3.2.2.	La production du GPL à partir du reforming catalytique.....	29
II.3.2.3.	La production du GPL à partir du craquage catalytique :	30
II.4.	LE STOCKAGE DU GPL.....	31
II.5.	L'UTILISATION DU GPL.....	32
II.5.1.	<i>Dans la pétrochimie.</i>	33
II.5.2.	<i>Utilisations domestiques :</i>	35
II.5.3.	<i>Utilisations industrielles :</i>	36
II.5.4.	<i>Utilisation comme carburant (GPL_C).</i>	38
II.5.5.	<i>Utilisation pour la production d'électricité.</i>	39
II.5.6.	<i>Utilisation dans le secteur agricole.</i>	39
II.5.7.	<i>Utilisations itinérantes.</i>	40
II.6.	LA DEMANDE NATIONALE EN GPL	41
II.7.	LA CONSOMMATION NATIONALE DU GPL.....	42
II.8.	LES AVANTAGES ET LES INCONVÉNIENTS DU GPL	43
II.8.1.	<i>Les avantages du GPL</i>	43
II.8.2.	<i>Les avantages du GPL au tant que carburant</i>	45
II.8.3.	<i>Les inconvénients du GPL</i>	46
CHAPITRE.III.DÉSULFURATION DU GPL		47
III.1.	INTRODUCTION	48
III.2.	PROBLÈMES LIÉS À LA PRÉSENCE DU SOUFRE DANS LE GPL.....	48
III.3.	LES MÉTHODES DE DÉSULFURATION DU GPL.....	50
III.3.1.	<i>La désulfuration du GPL par absorption.</i>	50
III.3.2.	<i>Désulfuration par adsorption</i>	56
III.3.3.	<i>Désulfuration du GPL par extraction liquide-liquide</i>	57
III.3.4.	<i>Désulfuration du GPL par perméation membranaire</i>	58
III.4.	LES SOLVANTS ALCANOLAMINES	59
III.5.	LES DIFFÉRENTES CLASSES DES AMINES	60
III.5.1.	<i>Les amines primaires (R₁NH₂)</i>	60
III.5.2.	<i>Les amines secondaires (R₁R₂NH)</i>	61
III.5.3.	<i>Les amines tertiaires (R₁R₂R₃N)</i>	62
III.6.	COMPARAISON ENTRE LES TYPES DES AMINES	63
CHAPITRE.IV. DESCRIPTION DE L'UNITÉ DE TRAITEMENT DU GPL		
600/700 DE LA RA1D.....		65
IV.1.	INTRODUCTION	66
IV.2.	L'OBJECTIF DE L'UNITÉ	66
IV.3.	DESCRIPTION DE L'UNITÉ 600 DE TRAITEMENT DU GPL PAR AMINE	67
IV.3.1.	<i>Désulfuration du GPL par extraction liquide-liquide par l'amine</i>	67
IV.3.2.	<i>La régénération d'amine d'extraction</i>	67
IV.4.	DESCRIPTION DE L'UNITÉ 700 DE TRAITEMENT DU GPL PAR LA SOUDE	69

IV.4.1.	<i>Généralités sur le procédé MEROX</i>	69
IV.4.2.	<i>Description de l'unité 700</i>	70
CHAPITRE.V. GÉNÉRALITÉS SUR LA SIMULATION		73
V.1.	INTRODUCTION	74
V.2.	GÉNÉRALITÉS SUR LA SIMULATION.....	74
V.2.1.	<i>Définition</i>	74
V.2.2.	<i>Le but d'une simulation</i>	74
V.3.	LE SIMULATEUR HYSYS	74
V.3.1.	<i>Définition</i>	74
V.3.2.	<i>Concepts et caractéristiques du simulateur Aspen HYSYS</i>	75
V.3.2.1.	Fluide package	75
V.3.2.2.	L'Environnement dans Aspen HYSYS (Aspen HYSYS Environnements)	76
V.3.2.3.	Le sous-environnement de subflowsheet	76
V.3.2.4.	La vue Propriété dans Aspen HYSYS	76
V.4.	LES TYPES DE MODÈLES THERMODYNAMIQUES	77
V.5.	UTILISATION DES MODÈLES THERMODYNAMIQUES DANS L'INDUSTRIE.....	80
CHAPITRE.VI.ÉTUDE DU FONCTIONNEMENT DE L'EXTRACTEUR C203-601 PAR SIMULATION.....		82
VI.1.	INTRODUCTION ET MÉTHODOLOGIE DU TRAVAIL	83
VI.2.	LES DONNÉES LIÉES À L'EXTRACTEUR C203-601	83
VI.3.	SIMULATION DE L'UNITÉ 600 DE TRAITEMENT DU GPL	85
VI.3.1.	<i>Le choix du modèle thermodynamique</i>	85
VI.3.2.	<i>Schémas de la simulation de la colonne d'extraction et de régénération</i>	85
VI.4.	RÉSULTATS DE LA SIMULATION.....	87
VI.5.	L'ÉTUDE D'INFLUENCE DES PARAMÈTRES OPÉRATOIRES SUR LE FONCTIONNEMENT DE L'EXTRACTEUR C203-601	93
VI.5.1.	<i>La température</i>	93
VI.5.2.	<i>Concentration de l'amine dans le solvant</i>	97
CONCLUSION GÉNÉRALE		102
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		104

Liste des figures

Figure I-1. Situation géographique de la raffinerie RA1D. [2].....	7
Figure I-2 Les différents gisements de l'alimentation de RA1D.	9
Figure I-3 Schéma simplifié du topping.	12
Figure I-4 Schéma simplifié du procédé du craquage catalytique.	13
Figure I-5 Schéma simplifié du procédé de reforming catalytique.....	14
Figure I-6 La batterie d'osmose inverse.	15
Figure I-7 Chaudière.	16
Figure I-8 Unité d'air comprimé.....	17
Figure I-9 Tour de refroidissement.	18
Figure I-10 Turbo-générateur.	19
Figure I-11 Générateur turbo-diesel.....	19
Figure I-12 Bassin de traitement des eaux usées.	19
Figure II-1 Les sources du GPL.....	27
Figure II-2 Schéma d'obtention des coupes pétrolières à partir du Topping. [10]	28
Figure II-3 Schéma d'obtention du GPL à partir du reforming catalytique.....	29
Figure II-4 Schéma d'obtention des coupes pétrolières à partir du craquage catalytique.	31
Figure II-5 Stockage du GPL dans des sphères. [15].....	32
Figure II-6 Les Principales transformations du propane dans la pétrochimie.	33
Figure II-7 Les Principales transformations du butane dans la pétrochimie.	35
Figure II-8 L'utilisation du GPL pour le chauffage.	36
Figure II-9 Les utilisations industrielles du GPL.....	38
Figure II-10 Utilisation du GPL comme carburant.	39
Figure II-11 L'utilisation du GPL dans le secteur agricole.	40
Figure II-12 Utilisations itinérantes du GPL.	41
Figure II-13 La demande nationale en GPL.	41
Figure II-14 La consommation du GPL par secteur.....	42
Figure IV-1 Schéma simplifié du procédé de désulfuration du GPL. [24]	68
Figure IV-2 Schéma simplifié sur le principe d'une unité d'extraction des mercaptans par le procédé MEROX. [23].....	70
Figure IV-3 Schéma simplifié du procédé de désulfuration du GPL par oxydation. [24]	72
Figure V-1 Schéma simplifié sur la structure du simulateur hysys. [25]	75
Figure VI-1 Schéma de simulation de l'extracteur de l'unité 600 de traitement du GPL par amine.....	86
Figure VI-2 Schéma de simulation de régénérateur de l'unité 600 de traitement du GPL par amine.....	86
Figure VI-3 Les fractions molaires de la composition du GPL à la sortie de la colonne de désulfuration en utilisant la MEA, DEA et la MDEA	91
Figure VI-4 Taux d'extraction de H ₂ S et H ₂ O+HC par MEA, DEA et MDEA.	92
Figure VI-5 Diagramme représentant les variations de H ₂ S dans le GPL désulfuré en fonction de la température de MEA pauvre.	94

Figure VI-6 Diagramme représentant les variations de H ₂ S dans le GPL désulfuré en fonction de la température de DEA pauvre.	95
Figure VI-7 Diagramme représentant les variations de H ₂ S dans le GPL désulfuré en fonction de la température de MDEA pauvre.	96
Figure VI-8 Diagramme représentant la variation de la teneur en H ₂ S dans le GPL désulfuré en fonction du taux de MEA pauvre.	98
Figure VI-9 Diagramme représentant la variation de la teneur en H ₂ S dans le GPL désulfuré en fonction du taux de DEA pauvre.	99
Figure VI-10 Diagramme représentant la variation de la teneur en H ₂ S dans le GPL désulfuré en fonction du taux de MDEA pauvre.	100

Liste des tableaux

Tableau I-1. La capacité de production à la raffinerie RA1D.	10
Tableau I-2 Les caractéristiques du pétrole brut.	10
Tableau II-1 Propriétés physiques du GPL. [10]	25
Tableau II-2 D'autres propriétés du GPL.....	25
Tableau II-3 La différence des émissions entre le GPL et l'essence.....	43
Tableau II-4 L'équivalence thermique du propane.	44
Tableau V-1 Les utilisations des modèles thermodynamique pour les processus industriels.....	81
Tableau VI-1 Composition de la charge GPL.....	83
Tableau VI-2 Composition de la charge GPL.....	84
Tableau VI-3 L'amine pauvre (solvant) à l'alimentation.....	84
Tableau VI-4 Composition du GPL à la sortie d'extracteur en utilisant MEA.....	87
Tableau VI-5 Paramètres de sortie du GPL désulfuré en utilisant MEA.	88
Tableau VI-6 Paramètres d'amine riche à la sortie de la colonne en utilisant MEA.	88
Tableau VI-7 Composition du GPL à la sortie d'extracteur en utilisant DEA.	88
Tableau VI-8 Paramètres de sortie du GPL désulfuré en utilisant DEA.....	89
Tableau VI-9 Paramètres d'amine riche à la sortie de la colonne en utilisant DEA.....	89
Tableau VI-10 Composition du GPL à la sortie d'extracteur en utilisant MDEA.....	90
Tableau VI-11 Paramètres de sortie du GPL désulfuré en utilisant MDEA.	90
Tableau VI-12 Paramètres d'amine riche à la sortie de la colonne en utilisant MDEA. ..	91
Tableau VI-13 Les variations de H ₂ S dans le GPL désulfuré en fonction de la température de MEA pauvre.	93
Tableau VI-14 Variations de H ₂ S dans le GPL désulfuré en fonction de la température de DEA pauvre.....	94
Tableau VI-15 Variations de H ₂ S dans le GPL désulfuré en fonction de la température de MDEA pauvre.	95
Tableau VI-16 Variation de H ₂ S dans le GPL désulfuré en fonction du taux de MEA pauvre.....	97
Tableau VI-17 Variation de H ₂ S dans le GPL désulfuré en fonction du taux de DEA pauvre.....	98
Tableau VI-18 Variation de H ₂ S dans le GPL désulfuré en fonction du taux de MDEA pauvre.....	99

Introduction générale

Introduction générale

L'industrie du raffinage occupe une position stratégique au sein de la chaîne de valeur des hydrocarbures, en raison de son rôle essentiel dans l'économie globale : elle transforme le pétrole brut, ressource primaire, en une multitude de produits dérivés à haute valeur ajoutée. Ces produits, qui incluent notamment les carburants, les lubrifiants et diverses matières premières cruciales pour l'industrie chimique, sont indispensables à de nombreux secteurs économiques. Les opérations de raffinage du pétrole, au cœur de cette industrie, reposent sur des processus hautement sophistiqués. Ces processus fractionnent le pétrole brut en ses différents composants chimiques utilisables, dont le gaz de pétrole liquéfié (GPL), essentiel tant pour le secteur énergétique que pour l'usage domestique.

Le GPL, principalement composé de propane et de butane, est extrait du pétrole brut lors du raffinage ou du traitement du gaz naturel. Ce produit se caractérise par sa grande polyvalence et sa capacité à se liquéfier sous pression modérée, facilitant ainsi son transport et son stockage. Utilisé dans de multiples applications telles que le chauffage domestique, la cuisson et comme carburant alternatif pour les véhicules, le GPL est également reconnu pour ses qualités écologiques. Brûlant plus proprement que d'autres sources d'énergie fossile, il émet moins de particules fines et de dioxyde de soufre, contribuant ainsi à une réduction des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre.

En plus de ses applications et avantages écologiques, le GPL est soumis à des normes strictes pour garantir sa sécurité et sa qualité. Parmi ces normes, la teneur en hydrogène sulfuré (H_2S) est rigoureusement contrôlée. En effet, la valeur maximale acceptable d' H_2S dans le GPL est fixée à moins de 5 parties par million (ppm), une limite essentielle pour prévenir les risques de corrosion et d'émissions toxiques. Cette régulation illustre l'engagement de l'industrie du raffinage à fournir des produits non seulement efficaces mais également sûrs et respectueux de l'environnement. La capacité à combiner efficacité énergétique et réduction de l'impact environnemental fait du GPL un acteur important dans la recherche de solutions énergétiques durables et sûres.

Pour assurer la conformité avec les normes strictes concernant la teneur en soufre dans le GPL, l'industrie du raffinage recourt à plusieurs méthodes de désulfuration, chacune visant à réduire efficacement les concentrations de soufre à des niveaux acceptables. Ces techniques sont essentielles pour répondre aux exigences réglementaires et pour garantir que le GPL reste une source d'énergie propre et sûre. Parmi ces méthodes on trouve, l'adsorption, l'absorption et l'extraction en utilisant des solvants d'amines qui sont particulièrement valorisée pour leur capacité à réduire efficacement les niveaux de soufre, contribuant à la production d'un GPL qui répond aux normes environnementales les plus rigoureuses. Ces procédés améliorent non seulement la qualité du GPL mais réduisent aussi les émissions nocives, alignant ainsi l'utilisation du GPL avec les objectifs de santé publique et de protection de l'environnement.

Dans le cadre de notre étude, nous nous concentrons sur l'analyse du fonctionnement de la colonne de désulfuration du GPL C203601 en utilisant trois types différents de solvants à base d'amine. Notre objectif est d'évaluer l'efficacité de ces solvants dans le processus de désulfuration. Pour ce faire, nous présentons nos 6 chapitres.

- Chapitre 1 : Présentation de la raffinerie d'Adrar RA1D

Dans ce premier chapitre, nous procédons à une introduction de la raffinerie d'Adrar RA1D, le lieu de notre étude. Nous décrivons ses principales caractéristiques, son importance dans le contexte industriel et géographique, ainsi que son rôle dans le processus de raffinage du pétrole.

- Chapitre 2 : Généralités sur le GPL

Dans ce chapitre, nous abordons de manière détaillée le gaz de pétrole liquéfié (GPL). Nous discutons de ses sources de production, de ses propriétés physiques et chimiques, ainsi que de ses spécifications et normes de qualité. Nous examinons également ses multiples applications dans divers secteurs industriels et domestiques.

Chapitre 3 : Méthodes de désulfuration du GPL

Ce troisième chapitre se concentre sur les différentes méthodes de désulfuration utilisées dans l'industrie du raffinage. Nous discutons les défis posés par la présence de soufre dans ce carburant. Ensuite, nous passons en revue les principaux procédés de désulfuration, en mettant l'accent sur les solvants à base d'amine et d'autres techniques couramment utilisées pour éliminer le soufre du GPL.

- Chapitre 4 : Description de l'unité de désulfuration du GPL 600/700 de la RA1D

Dans ce chapitre, nous détaillons l'unité spécifique de désulfuration du GPL, en l'occurrence l'unité 600-700. Nous décrivons les équipements, les processus et les technologies utilisés dans cette unité, notamment le traitement par amine et le procédé Mérox.

- Chapitre 5 : Généralités sur la simulation.

Dans ce chapitre, nous avons exploré les principes fondamentaux de la simulation, en mettant en évidence son rôle crucial dans la modélisation des processus industriels. Nous avons présenté le logiciel de simulation ASPEN HYSYS et discuté de l'utilisation des modèles thermodynamiques dans l'industrie, en les comparant pour déterminer le plus adapté à notre étude sur la désulfuration du GPL.

- Chapitre 6 : Etude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation.

Ce dernier chapitre, est consacré à la simulation de la colonne d'extraction à l'aide du logiciel Hysys sous différentes conditions opératoires. Les résultats obtenus seront analysés pour évaluer les performances des différents solvants à base d'amine dans le

processus de désulfuration et l'influence de la température et la concentration en amine du solvant sur l'opération.

- Enfin nous avons terminé par une conclusion générale.

Chapitre.I. Présentation de la raffinerie d'Adrar

I.1. Introduction

Dans le cadre énergétique algérien, l'atteinte de l'autosuffisance et l'exportation de ressources énergétiques manufacturées se conjuguent avec l'exploitation stratégique des cinq raffineries présentes sur et hors le territoire national. Parmi celles-ci, la raffinerie d'Adrar, désignée sous le sigle RA1D, émerge comme un pilier majeur dans le paysage régional de la wilaya d'Adrar et de ses zones limitrophes. Contrairement à d'autres raffineries axées principalement sur la rentabilité économique, l'objectif premier de la raffinerie d'Adrar réside dans la satisfaction des besoins énergétiques de la population locale à travers la production de combustibles manufacturés.

Dans ce chapitre dédié à la description de la raffinerie d'Adrar, seront abordés son historique, sa localisation géographique, sa capacité de traitement et de production, ainsi que les différentes unités de production et les utilités qui la composent.

I.2. Historique de la raffinerie RA1D

L'historique de la raffinerie d'Adrar remonte à la période du plan quinquennal d'investissement couvrant les années 2001-2005. La décision d'inclure la construction de cette raffinerie dans ce plan s'inscrivait dans la volonté de développer l'infrastructure nationale liée au secteur pétrolier.

Les travaux de construction de la raffinerie ont débuté en juin 2004, marquant le lancement concret du projet. La réalisation de ce projet d'envergure a été confiée à la China National Petroleum Corporation (CNPC), une société chinoise spécialisée dans le secteur pétrolier pour un coût global de 167 millions de dollars. Cette collaboration internationale a permis de mobiliser les ressources nécessaires et le savoir-faire technique pour mener à bien construire la raffinerie. [1]

La raffinerie est entrée en exploitation le mois de mai de l'année 2007.

La raffinerie d'Adrar précédemment nommée SORALCHIN était une coentreprise sino-algérienne entre la China National Petroleum Corporation (CNPC) et la Société Nationale de l'Industrie pétrolière (SONATRACH) en Algérie. Dès 2014, cette dernière a nationalisé entièrement cette entreprise, la rendant 100% algérienne sous le nom de la raffinerie d'Adrar RA1D.

I.3. Situation géographique de la raffinerie d'Adrar

La raffinerie d'Adrar, l'un des cinq établissements de transformation du pétrole les plus éminents d'Algérie, est érigée au sein de la zone industrielle d'Adrar. Enclavée dans la portion orientale de la cité, elle se trouve à une distance approximative de 44 kilomètres du cœur urbain d'Adrar et à environ 2 kilomètres de la ville de SBAA. Jouissant d'une position géographique stratégique, à quelque 1400 kilomètres de la capitale Alger, cette installation revêt une importance primordiale dans le tissu industriel régional. [2]

Elle est limitée :

- Au Nord : par la daïra de Tsabit ;
- Au Sud : par la commune de Gurara ;
- À l'Ouest : par la commune de Sbaa ;
- À l'Est : par un terrain non urbanisé.



Figure I-1. Situation géographique de la raffinerie RA1D. [2]

I.4. L'alimentation de la raffinerie RA1D

La raffinerie de RA1D se trouve approvisionnée en hydrocarbures bruts des réserves du bassin de Touat, acheminé à travers un pipeline de 8 pouces, provenant de quatre sites distincts : SBAA-1, SBAA-3, Hassi Illatou et OTRA (Oued Tourhar).

- Les gisements de SBAA-1 et SBAA-3, sis à l'occident de la commune de SBAA, contribuent à l'approvisionnement en brut, acheminé ensuite vers le centre de traitement (CPF). Là, par le biais d'une décantation, l'eau est séparée du liquide huileux, avant que ce dernier ne soit conduit à la raffinerie par conduite forcée.
- Le gisement de Hassi Illatou, situé à 90 km à l'orient de la wilaya d'Adrar et au sud-est de l'installation de raffinage, est équipé de douze puits d'extraction, chacun étant associé à un puits injecteur d'eau. L'exploitation du brut s'y déroule de manière alternée entre ces infrastructures.
- Quant au gisement d'OTRA, s'étendant au nord-est de ladite wilaya d'Adrar, il est doté de sept puits d'extraction accompagnés de dispositifs d'injection d'eau. Les hydrocarbures bruts provenant des gisements de Hassi Illatou et d'OTRA sont dirigés vers le CPF, où ils subissent un processus de séparation de l'eau. Préalablement à cette phase, le brut est soumis à un refroidissement par le biais de condenseurs, avant d'être dirigé vers des réservoirs de stockage où l'eau résiduelle est éliminée à la suite de la décantation. [3]

Tandis que l'approvisionnement en gaz naturel est assuré par la station de SONATARACH de Sbaa, située à 6,5 kilomètres au sud-est du site, via un pipeline de 4 pouces. Cette configuration vise à répondre aux exigences de gaz nécessaires au lancement des chaudières de la centrale ainsi qu'aux divers fours des unités de production.

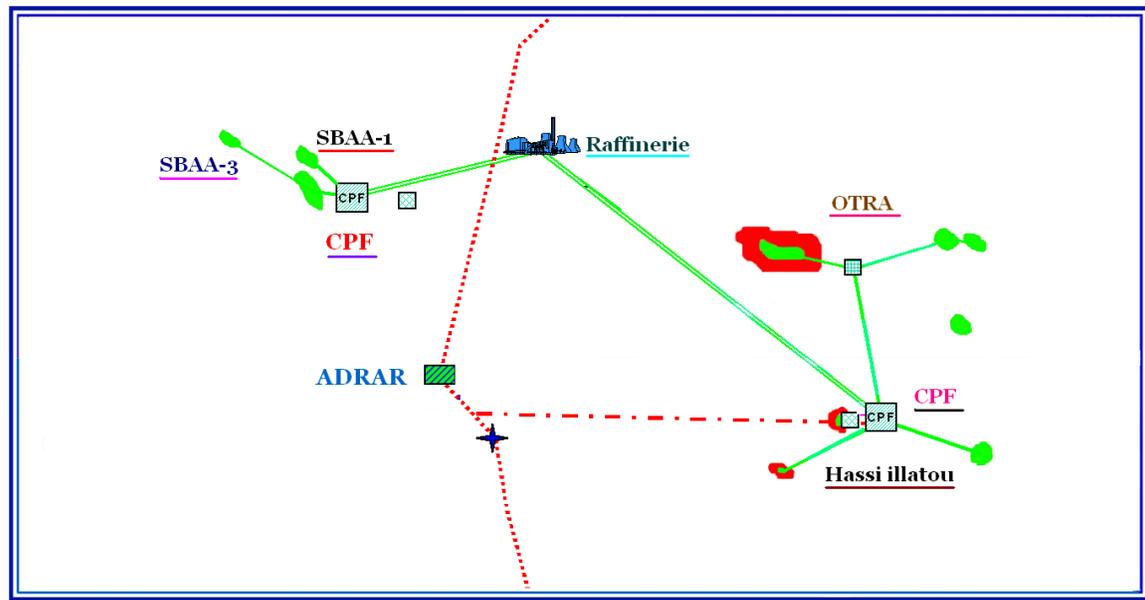


Figure I-2 Les différents gisements de l'alimentation de RA1D.

I.5. La capacité annuelle de traitement et de production de la raffinerie RA1D

I.5.1. La capacité de traitement

La raffinerie de SBAA est dotée d'une capacité annuelle de traitement d'environ 600 000 tonnes de pétrole brut, fonctionnant de manière ininterrompue sur une période d'un an, avec une exploitation quotidienne de vingt-quatre heures. Cette capacité se traduit par un rendement de 75 tonnes par heure, 1800 tonnes par jour, ou encore 12 500 barils par jour. [2]

I.5.2. La capacité de production

Le pétrole brut extrait des réservoirs de stockage est soumis à un processus de transformation au sein de l'usine, donnant naissance à une gamme variée de produits de qualité différente dont la capacité de production est mentionnée dans le tableau en dessous.

Tableau I-1. La capacité de production à la raffinerie RA1D.

Produits	Quantités (Tonnes/An)
Propane	20 500
Butane	32 500
Essence super	10 000
Essence normale	208 300
Kérosène	30 000
Gasoil	238 400
Mazout	13 000

I.6. Les unités de production

La raffinerie RA1D dispose de trois unités de production : [4]

- Unité de distillation atmosphérique ou TOPPING
- Unité de REFORMING CATALYTIQUE
- Unité de craquage catalytique ou FCC

La raffinerie est équipée de trois bacs de stockage à toit flottant, ayant une capacité de 4000 tonnes chacun. En conditions de fonctionnement normales, la raffinerie peut traiter jusqu'à 600 000 tonnes par an. Cependant, sa capacité de traitement maximale est de 700 000 tonnes par an, tandis que sa capacité minimale est de 420 000 tonnes par an.

Les principales caractéristiques du pétrole brut servant d'alimenter la raffinerie sont détaillés dans le tableau présenté ci-dessous.

Tableau I-2 Les caractéristiques du pétrole brut.

Densité (g/L)	0,834
Teneur en soufre (en %)	0,14
Teneur en NaCl (mg/L)	8
Acidité	0.04

Compte tenu de ces spécifications, le brut traité est classé comme étant un brut moyen à faible teneur en soufre.

I.6.1. L'unité de distillation atmosphérique CDU (U201)

L'unité de distillation atmosphérique, connue sous l'appellation TOPPING, est l'unité mère de la raffinerie. Elle se compose d'une colonne pré-flash et d'une colonne atmosphérique.

La colonne pré-flash est utilisée pour séparer les produits les plus légers, tels que le GPL et le naphta, du brut initial. Le préchauffage du brut s'effectue initialement par le biais d'une pompe depuis le réservoir de stockage à travers une série d'échangeurs thermiques, portant la température du brut à environ 90°C. Par la suite, le brut est chauffé davantage à travers une série d'autres échangeurs, atteignant finalement 126°C, puis 242°C. À cette température, le brut entre dans la colonne pré-flash où il est partiellement vaporisé, avec les vapeurs dirigées vers le haut de la colonne et les liquides recueillis en bas. Les gaz incondensables sont évacués vers un ballon de séparation, puis dirigés vers un four. Pendant ce temps, le brut flashé du fond de la colonne est réintroduit dans le processus.

Le brut est ensuite chauffé dans un four atmosphérique, où il subit une série de traitements thermiques, atteignant une température finale de 360°C. La zone de convection du four est également utilisée pour produire de la vapeur stripping, chauffée à 400°C et injectée dans la colonne atmosphérique. Dans cette dernière, le brut entre par la zone de flash, se séparant en fractions légères migrantes vers la zone de rectification et en brut résiduel tombant au fond de la colonne. La pression et la température à la tête de la colonne sont respectivement de 0,05 MPa et 130°C. Les vapeurs de tête sont refroidies à travers des échangeurs et des aéro-réfrigérants, aboutissant à un mélange partiellement condensé collecté dans un ballon de reflux. [5]

Les différents soutirages de la colonne de distillation sont :

- Naphta lourd (inférieure à 165 °C) ;
- Kérosène (165 °C – 240°C) ;
- Gasoil léger (240 °C – 300 °C) ;
- Gasoil lourd (300 °C – 360 °C) ;
- Résidu atmosphérique (supérieur à 360 °C).

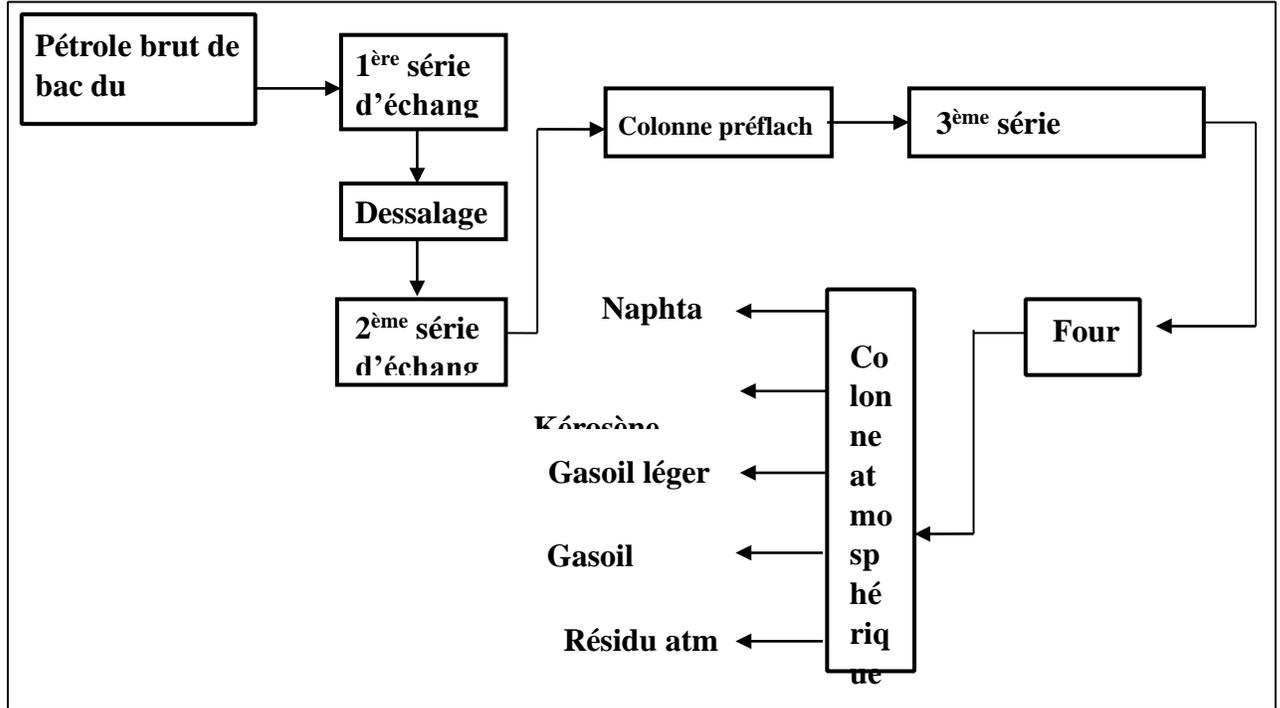


Figure I-3 Schéma simplifié du topping.

I.6.2. Unité de craquage catalytique RFCC (U203) :

L'Unité de Craquage Catalytique, également connue sous le nom de RFCC (Residu Fluid Catalytic Cracking), représente un maillon crucial dans le processus de raffinage, s'occupant du traitement du résidu provenant de la distillation atmosphérique, avec une capacité annuelle de 300 000 tonnes, soit environ la moitié de la production totale de la raffinerie. Ses principales productions comprennent des essences, du gasoil léger, des GPL, du slurry (résidu), et des gaz incondensables.

La RFCC est structurée en trois sections principales : la section réactionnelle, la section de fractionnement, et la section de traitement.

La section réactionnelle, au cœur de l'unité, se compose d'un réacteur et d'un régénérateur. Le réacteur, avec son élément central le Rizer, permet la pulvérisation fine d'une charge catalytique, amorçant ainsi les réactions de craquage catalytique à l'intérieur, tandis que les produits résultants sont collectés au sommet. La séparation entre les produits réactionnels et le catalyseur s'effectue dans un désengager, suivi d'un stripper qui élimine les hydrocarbures restants. Le régénérateur, quant à lui, permet la régénération du

catalyseur utilisé par combustion du coke avec de l'air chaud, ce processus se déroulant en circuit continu et rapide.

La section de fractionnement primaire traite les produits du réacteur dans une colonne de préfractionnement, facilitant la séparation entre les produits légers et lourds. Le fond de la colonne est constitué principalement d'une huile lourde appelée slurry, utilisée comme reflux après refroidissement, une partie étant récupérée après filtration. [6]

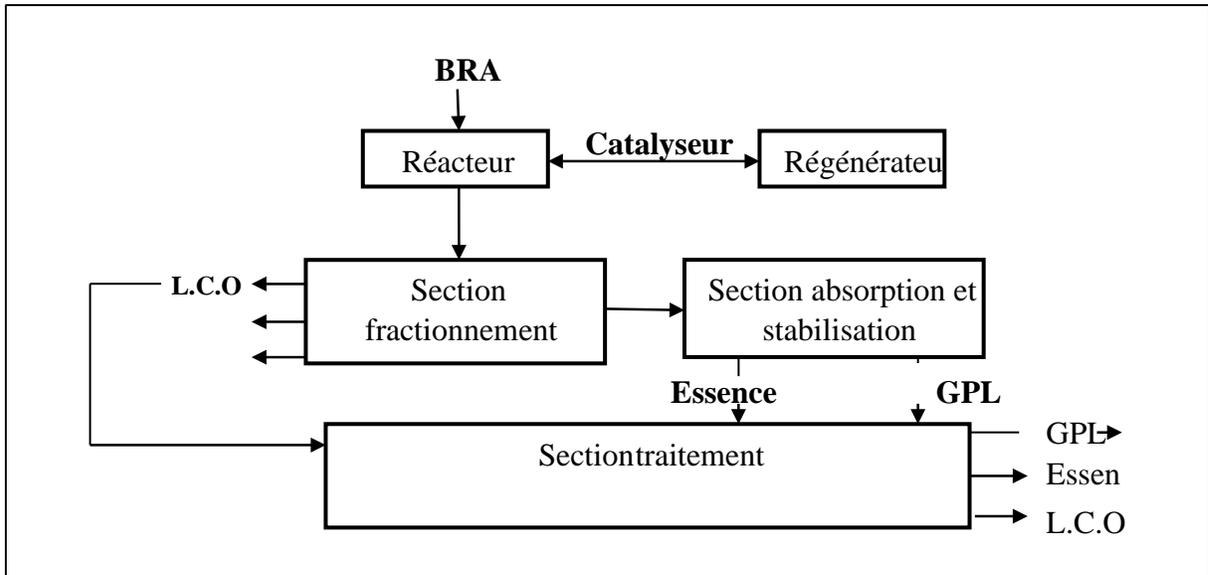


Figure I-4 Schéma simplifié du procédé du craquage catalytique.

I.6.3. L'unité de reforming catalytique CRU (U202)

L'Unité de Reformage Catalytique représente un élément crucial de la chaîne de production, spécialement conçue pour traiter le naphta provenant de l'unité de distillation atmosphérique. Avec une capacité de traitement estimée à 100 000 tonnes par an, son objectif premier est la production de carburant sans plomb de qualité supérieure, caractérisé par un indice d'octane élevé (NO=94). En plus de ce produit principal, l'unité génère divers sous-produits, dont le GPL, le naphta léger, des hydrocarbures liquides et des gaz incondensables, ce dernier servant de combustible pour les fours de l'installation, tandis que l'hydrogène est utilisé dans les réactions du processus.

Structurée en deux sections principales, incluant une phase de prétraitement de la charge et une section réactionnelle, l'unité est complétée par des systèmes auxiliaires tels qu'un système de chauffage et de gaz combustible. Les produits finis, notamment l'essence à haut indice d'octane et le naphta léger, sont acheminés vers la zone de stockage, tandis

que le GPL est dirigé vers la section de séparation des gaz. L'hydrogène, en tant que sous-produit, est acheminé via le réseau de canalisations dédié au gaz combustible.

Le flux de matières premières vers l'unité de reformage catalytique est assuré par un système de pipelines reliant les bacs intermédiaires, garantissant un approvisionnement continu et efficace pour l'ensemble du processus de production. [7]

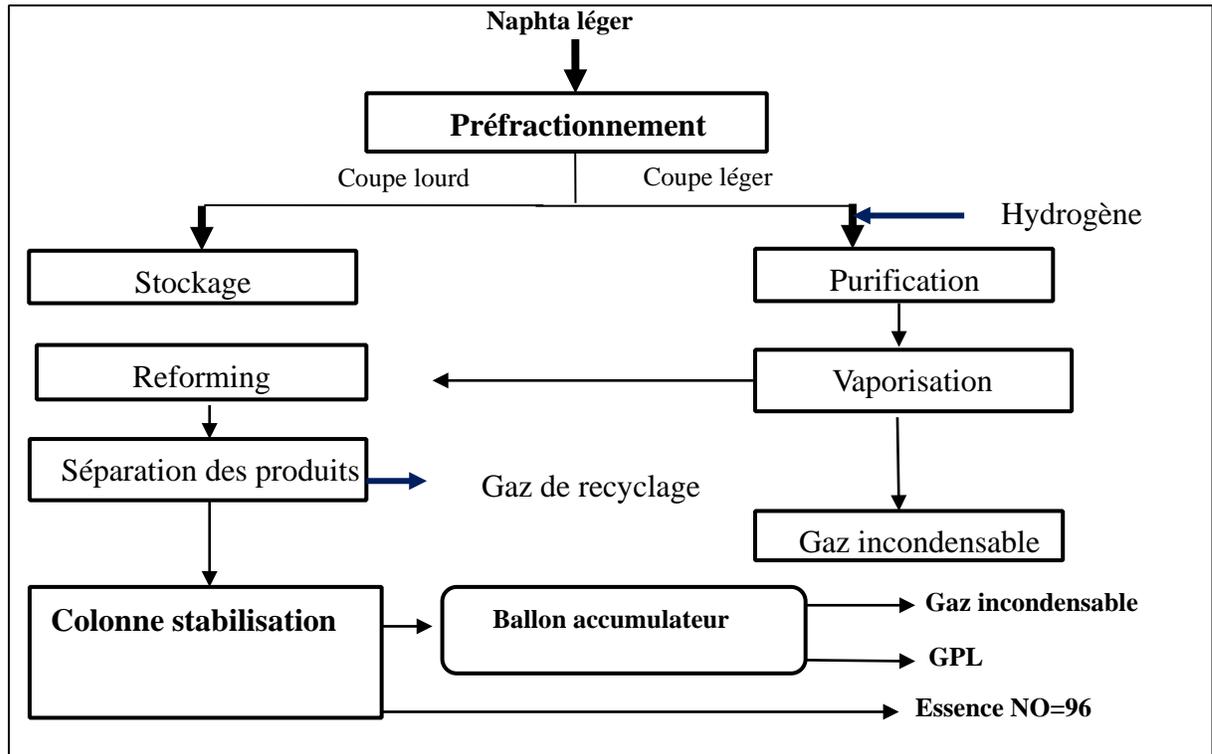


Figure I-5 Schéma simplifié du procédé de reforming catalytique.

I.7. Les utilités de la raffinerie RA1D

La raffinerie est dotée des utilités suivantes: [8]

- unité de traitement des eaux
- unité de production de vapeur
- unité de production et de distribution d'énergie électrique
- unité de production d'air comprimé
- unité d'aéro-refroidissement
- unité de traitement des eaux usées.

I.7.1. Unité de traitement des eaux

Le rôle de cette unité est de traiter les eaux de sources (brute) pour les utiliser dans le refroidissement (dans les échangeurs à l'eau froide).

La raffinerie se trouve approvisionnée en eau brute par le biais de trois forages situés au nord-est, à une distance d'environ un kilomètre. Le transport de cette eau est assuré par des conduites de 12 pouces, interconnectées en parallèle. Concernant le stockage de cette eau brute, la raffinerie est équipée de 03 réservoirs de stockage, deux dédiés à des fins d'urgence en cas d'incendie, tandis qu'un troisième est destiné à l'alimentation des différentes unités de production, des installations auxiliaires, ainsi qu'aux besoins quotidiens de la vie sur le site.

Le traitement des eaux souterraines se fait selon le procédé suivant :

L'approvisionnement en eau brute du poste de traitement est assuré par l'action de deux pompes. Cette eau est soumise à un processus de chauffage à travers un échangeur afin d'accroître sa température. Subséquemment, elle est introduite dans un dispositif d'aération pour permettre son barbotage avec de l'air, avant l'injection d'un floculant afin de faciliter la coagulation des particules en suspension. La suite du traitement consiste en son passage à travers la batterie de filtres D60201, destinée à capturer les matières en suspension agglomérées par le floculant. Par la suite, un inhibiteur est injecté afin de réduire la vitesse des réactions, suivi d'un échangeur de chaleur à vapeur pour accroître la température. Enfin, l'eau est dirigée à travers la batterie d'osmose inverse pour réaliser le processus de dessalement primaire. Cette méthode sert à maintenir le pH de l'eau dans le domaine 8,5 - 9,5 par l'acide chlorhydrique et l'élimination des algues par le chlore et d'autres biacides. L'autre technique utilisée est le dégazage physique avec l'air pour éliminer l'oxygène dissout dans l'eau.



Figure I-6 La batterie d'osmose inverse.

I.7.2. Unité de production de vapeur (chaudière)

Pour la génération de vapeur, la raffinerie de Sbaa est équipée de trois chaudières d'une capacité de 35 tonnes par heure, opérant à une pression de 35 bars et une température de 440°C, ainsi que de deux générateurs de vapeur de l'unité RFCC, chacun capable de produire entre 20 et 26 tonnes par heure à une pression de 35 bars et une température de 440°C. Dans des conditions normales, deux de ces trois chaudières doivent être opérationnelles tandis que la troisième reste en stand-by, prête à être mise en service au besoin.

La vapeur produite, connue sous le nom de vapeur moyenne pression (35 bars/440°C), est utilisée pour plusieurs fonctions, notamment l'alimentation de trois turbogénérateurs, des deux turbo ventilateurs de l'unité RFCC et du désurchauffeur de chaudière pour réguler la température et la pression de la vapeur.

Un second réseau, appelé réseau de vapeur basse pression (10 bars/260°C), est alimenté par le soutirage des deux turbo ventilateurs ainsi que du désurchauffeur. Ce réseau fournit de la vapeur à diverses installations, notamment le compresseur gaz RFCC, l'unité de distillation atmosphérique, l'unité de reforming, l'unité RFCC, les réservoirs de stockage des produits pétroliers, les installations de traitement des eaux usées, la centrale électrique et les installations de la base de vie.

Le fonctionnement des chaudières est assuré par le système de contrôle automatique DCS.



Figure I-7 Chaudière.

I.7.3. Unité de production d'air comprimé

La génération d'air comprimé et d'azote est assurée par trois compresseurs d'air, dont deux sont en fonctionnement et un est en réserve. Un dispositif de filtration est utilisé pour éliminer les impuretés présentes dans l'air.

Concernant l'air destiné aux instruments, il est traité par un processus de séchage au moyen d'une batterie de sécheurs afin d'éliminer les gouttelettes d'eau. Un réservoir de stockage d'air pour les instruments garantit une réserve d'air suffisante pour maintenir le fonctionnement de la raffinerie pendant une période de 30 minutes en cas de défaillance du système.

L'air non purifié est utilisé pour le nettoyage des instruments, tandis qu'une fraction de l'air est dirigée du compresseur vers une unité de pré-refroidissement avant d'être acheminée vers l'unité de purification d'azote (PPU).



Figure I-8 Unité d'air comprimé.

I.7.4. Tour de refroidissement

Le circuit de refroidissement reçoit son approvisionnement directement depuis le réservoir de stockage. L'eau subit un traitement incluant l'ajout d'inhibiteurs de corrosion et d'agents anti-algues. La raffinerie est pourvue de deux tours de refroidissement, l'une assurant l'alimentation de l'unité RFCC et l'autre de l'unité de la centrale électrique.



Figure I-9 Tour de refroidissement.

I.7.5. Unité de production et de distribution d'énergie électrique

Selon la conception prévue, la consommation totale d'énergie électrique est estimée à 6800 kilowattheures (kWh). Pour répondre à cette exigence, trois turbogénérateurs d'une puissance de 6000 kilowatts (kW) chacun, fonctionnant à une tension de 6.3 kilovolts (kV), sont installés, dont deux sont opérationnels tandis que le troisième reste en stand by. De plus, deux générateurs turbo diesel d'une capacité de 1100 kW chacun sont prévus comme source de secours en cas de défaillance accidentelle de l'alimentation électrique principale.

En situation normale, deux des générateurs en service alimentent la sous-station principale de distribution d'énergie électrique. Cette sous-station, opérant à une tension de 6.3 kV, alimente à son tour 12 sous-stations électriques de 6.3 kV/0.4 kV ainsi que 15 départs de 6.3 kV vers des moteurs à moyenne tension (MT). De plus, une ligne de SONELGAZ d'une capacité de 16 MVA, fonctionnant à une tension de 37 kV/6.3 kV, est maintenue en réserve pour faire face aux situations d'urgence.



Figure I-11 Générateur turbo-diesel.



Figure I-10 Turbo-générateur.

I.7.6. Unité de traitement des eaux usées

La capacité de traitement des eaux usées est de 100 mètres cubes par heure, avec deux systèmes opérationnels, comprenant un processus de traitement physique et un processus de traitement chimique.

Dans le camp de base, la station d'adoucissement de l'eau potable est approvisionnée par deux pompes. Après avoir été adoucie, l'eau est distribuée à une pression variante entre 2,5 et 3 bars, avec un débit de 2,5 mètres cubes par heure.



Figure I-12 Bassin de traitement des eaux usées.

Chapitre.II. Généralités sur le GPL

II.1. Introduction

Au cours des deux dernières décennies, une énergie alternative a émergé aux côtés des industries pétrolière et gazière : les gaz de pétrole liquéfiés (GPL). Représentant le pilier énergétique de l'Algérie, ce produit revêt une importance capitale en tant que source d'énergie majeure contribuant à combler les besoins énergétiques à l'échelle mondiale. Doté d'avantages indéniables en termes de propreté et de transportabilité, notamment pour l'industrie et l'automobile, le GPL connaît une demande mondiale avoisinant les 239 millions de tonnes en 2008. Sur le plan national, cette demande atteint actuellement environ 15 millions de tonnes. [1]

Le GPL, constitué essentiellement de propane et de butane, s'est imposé grâce à ses propriétés intrinsèques, sa polyvalence d'utilisation et son caractère non polluant, dénué de soufre. Par ailleurs, il représente une matière première pertinente pour la fabrication de polymères, suscitant ainsi un intérêt croissant dans divers domaines d'application. Ses avantages économiques et écologiques, tels que son coût de stockage et de transport raisonnable, sa sûreté d'approvisionnement et sa compétitivité tarifaire, en font un choix attractif.

Le propane, en particulier, présente un avantage majeur en réponse à une préoccupation mondiale grandissante : la préservation de la couche d'ozone. Son utilisation pourrait considérablement réduire les émissions de dioxyde de soufre, de dioxyde de carbone et de dioxyde d'azote, s'inscrivant ainsi dans une démarche de développement durable.

À l'échelle mondiale, des centaines de millions de personnes tirent aujourd'hui profit des gaz de pétrole liquéfié, couramment désignés sous le nom de GPL, pour une multitude d'applications : industrielles, de transport, agricoles, énergétiques, culinaires, de chauffage et de loisirs. Cependant, peu sont conscients de leur processus de production, de leurs origines et des principaux pays consommateurs.

Dans ce chapitre, nous entreprendrons une exploration approfondie des informations susmentionnées, en mettant en lumière les caractéristiques essentielles du gaz de pétrole liquéfié (GPL), sa composition, ses diverses applications et les sources d'approvisionnement qui en découlent.

II.2. Caractéristiques et propriétés du GPL

La caractérisation précise des propriétés physiques du GPL revêt une importance capitale dans divers domaines industriels et domestiques. Comprendre ces caractéristiques fondamentales est essentiel pour assurer une manipulation sécurisée et une utilisation efficace de ce combustible polyvalent. En effet, la connaissance approfondie de paramètres tels que la densité, le point d'ébullition, la pression de vapeur, et le point de fusion permet une exploitation judicieuse du GPL dans une variété d'applications. Ainsi, une analyse méticuleuse de ces propriétés s'avère être un pré-requis indispensable pour une utilisation optimale et sécurisée de cette ressource énergétique.

On cite en dessous ces propriétés :

II.2.1. Les principales propriétés du GPL

- **La densité :**

Sous les conditions ordinaires de température et de pression, il est constaté que le GPL, lorsqu'il se trouve dans son état gazeux, exhibe une densité supérieure à celle de l'air. Les valeurs de densité du propane et du butane sont respectivement établies à 0,51 et 0,58, cependant, elles connaissent un déclin parallèle à l'accroissement de la température. [9]

À titre d'exemple éclairant, à une élévation thermique de 38°C, la densité se révèle être de l'ordre de 0,534.

L'importance cruciale de la densité s'avère indéniable dans le contexte commercial entourant le GPL. Même des traces infimes de ce gaz dans un environnement aquatique ont la capacité de susciter des mélanges potentiellement dangereux, soulignant ainsi l'impérieuse nécessité de respecter rigoureusement les protocoles de sécurité au sein de l'industrie gazière.

- **Le point d'ébullition :**

À la pression atmosphérique conventionnelle, les propriétés thermodynamiques distinctes du propane et du butane déterminent le seuil de transition de leur état gazeux à liquide. Notamment, le propane se caractérise par un point d'ébullition inférieur à celui du butane : à une pression atmosphérique de 1 bar, le propane se condense en dessous de -42°C, tandis que le butane, lui, connaît sa transition vers l'état liquide dès que le thermomètre descend en deçà de 0°C. Ces nuances expriment subtilement mais significativement les dissemblances entre ces deux gaz. [10]

- **La tension de vapeur :**

En présence de températures excédant leur seuil d'ébullition, il est impossible d'induire la transition du propane et du butane vers l'état liquide par l'application de pression ou le recours à des méthodes de réfrigération.

La pression de vapeur du gaz de pétrole liquéfié (GPL) à une température de 20 °C se caractérise ainsi :

- ✓ Le butane : 2 bars
- ✓ Le propane : 8 bars.

Il est nécessaire de noter qu'avec une augmentation de température, on aura une augmentation de tension de vapeur. Par exemple à une température de 50°C, la tension de vapeur se caractérise en dessous :

- ✓ Le butane : 6.9 bars.
- ✓ Le propane : de 11.5 à 19.3 bars.

● La masse volumique :

La masse volumique du GPL varie en fonction de sa composition. En effet, pour le butane, elle est égale ou supérieure à 0,559 kg/l à une température de 15°C, reflétant ainsi sa densité caractéristique à cette condition thermique. De même, le propane présente une masse volumique égale ou supérieure à 0,502 kg/l à la même température de 15°C, ce qui témoigne de ses propriétés spécifiques en termes de densité. Ces valeurs illustrent la différence de comportement physique entre le propane et le butane au sein du GPL. [11]

● Le pouvoir calorifique :

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL) se démarque par son pouvoir calorifique, mesuré à 12,88 kWh/kg pour le pouvoir calorifique inférieur (PCI) et à 13,8 kWh/kg pour le pouvoir calorifique supérieur (PCS). [9]

Cette caractéristique est d'autant plus remarquable que le butane et le propane, constituants principaux du GPL, présentent des valeurs de pouvoir calorifique comparables. Cette propriété revêt une importance particulière, notamment dans le contexte de son utilisation traditionnelle pour les besoins domestiques.

En effet, les valeurs spécifiques de pouvoir calorifique telles que :

- ✓ 29460 kcal/kg pour le butane
- ✓ 22506 kcal/kg pour le propane
- ✓ 29622 kcal/kg pour le butène.

• La dilatation :

À l'état liquide, il convient de prendre en considération le coefficient de dilatation significatif du gaz de pétrole liquéfié (GPL) lors de son stockage, car il est essentiel de ne jamais remplir complètement les réservoirs ou les sphères.

En effet, la dilatation du GPL s'établit à environ 0,25% par degré Celsius, une donnée primordiale à prendre en compte pour garantir la sécurité et l'intégrité des dispositifs de stockage. [12]

• Teneur en soufre :

Les impuretés présentes dans le GPL revêtent une importance primordiale quant à leur gestion lors de son utilisation.

Le soufre se distingue comme l'élément majeur, avec une teneur généralement maintenue en deçà de 0,005% en masse, garantissant ainsi un degré de pureté optimal. [9]

• Teneur en eau :

Dans le cas spécifique du propane, une attention particulière est portée à la présence d'eau, constituant une impureté notable. Cette teneur doit être nulle.

• Corrosion à lame de cuivre :

Pour les deux gaz, le propane et le butane l'essai pour la corrosion à lame de cuivre indique 1b.

➤ Il faut noter qu'il existe d'autres caractéristiques telles que :

1/ Le GPL présente une non-corrosivité envers l'acier, mais généralement, il manifeste cette propriété à l'égard de l'aluminium, du cuivre et de leurs alliages.

2/ Le GPL ne démontre aucune propriété lubrifiante, ce facteur requiert une considération particulière lors de la conception et du dimensionnement des équipements destinés à son utilisation, tels que les compresseurs et les pompes.

3/ Il est susceptible de s'enflammer dans des limites relativement restreintes.

4/ Les caractéristiques physiques du GPL confèrent à cette source d'énergie un avantage certain en termes de stockage et de transport.

5/ De plus, le GPL se distingue par son indice d'octane recherché (RON) naturellement élevé, atteignant facilement 98. Cette particularité découle directement des valeurs de RON propres à chacun de ses constituants. En outre, son indice d'octane moteur (MON) s'avère légèrement supérieur à celui des essences classiques.

On résume d'autres propriétés physiques du GPL selon sa composition dans le tableau ci-dessous :

Tableau II-1 Propriétés physiques du GPL. [10]

caractéristiques des composants du GPL								
	méthane	éthylène	ethane	propylène	propane	iso-butane	butane	butane
Formule chimique	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₁₀
tension de vapeur à 10°C(kg/cm ²)	370	45	32	7.7	6,2	1,3	1,7	1,5
point d'ébullition à 760 mm Hg (°C)	-161,5	-103,7	- 88,5	- 47,7	- 42	- 11,7	- 6,2	- 0,5
pois spécifique en kg/litre	0,3		0,37	0,52	0,51	0,56	0,6	0,58
litres de gaz obtenus à partir d'un litre de liquide	443	333,7	294,3	283,5	272,7	229,3	252,9	237,8
pois spécifique du gaz à 15°C 760mm/Hg en kg/m ₃	0,677	1,18	1,27	1,77	1,86	2,45	2,37	2,45
pouvoir calorifique supérieur (kcal/kg)	13 288	12 028	12 417	11 700	11 980	11 828	11 589	11 586
kg d'air comburant par kg de gaz	17,4	15	16,2	15	15,8	15,6	15	15,6
nombre..... d'octane (Motor Method)	120	76	99	83	96	97	84	89

II.2.2. D'autres propriétés du GPL

On résume ce type de propriétés dans le tableau en dessous :

Tableau II-2 D'autres propriétés du GPL.

	Propriétés Chimiques	Conséquences Pratiques
Toxicité	Le Butane et le Propane ne sont pas toxiques.	

Couleur et odeur	<p>Le GPL est incolore, soit à l'état vapeur ou liquide.</p> <p>À l'état naturel, le GPL est inodore. Il peut donner, au contact de l'air, des mélanges explosifs ; pour des raisons de sécurité un odorant doit être ajouté. Cet odorant est à base de sulfures appelés Mercaptans. Le GPL que l'on trouve dans le commerce contient un additif odorant à base de soufre, afin de faciliter la détection des fuites.</p>	<p>L'odeur permet de signaler l'existence d'une fuite qui est recherchée avec un produit moussant, jamais avec une flamme.</p>
Etat gazeux	<p>Le GPL - aux conditions normales de pression et température est un gaz plus lourd que l'air.</p>	<p>En cas de fuite, il a tendance à s'accumuler dans les points bas.</p>
Etat liquide	<p>Le GPL liquide est plus léger que l'eau.</p>	<p>Les réservoirs sur les terrains inondables (instables) doivent être ancrés parce qu'ils risqueraient de flotter en cas d'inondation.</p>
Action sur les composés organiques	<p>Le GPL dissout les graisses, les huiles et les vernis.</p>	<p>Les joints et les triangles doivent être en caoutchouc synthétique de qualité appropriée.</p>
Solubilité	<p>Il est insoluble dans l'eau.</p>	
Fluidité	<p>Très fluide à l'état liquide et gazeux.</p>	<p>Le choix et la réalisation des circuits d'alimentation doivent se faire soigneusement.</p>

II.3. Les sources du GPL

La production des gaz de pétrole liquéfiés (GPL) résulte d'un processus complexe qui exploite deux sources principales : les champs de gaz naturel et les raffineries de pétrole. Les champs de gaz naturel, riches en méthane, propane et butane, fournissent une part significative des GPL, avec une extraction qui inclut un processus de refroidissement pour séparer les différents composants. Les raffineries de pétrole, quant à elles, produisent également des GPL à partir de coupes légères obtenues lors de la distillation du pétrole brut, renforcées par des opérations de traitement secondaires comme le

craquage et le reforming catalytique. Cette dualité dans les sources de production reflète la diversité des processus industriels impliqués, offrant une approche intégrée pour répondre à la demande croissante en GPL, essentiels dans divers secteurs tels que le chauffage, le transport et l'industrie. [10]



Figure II-1 Les sources du GPL.

II.3.1. L'obtention du GPL à partir des champs gaziers

Les champs de gaz naturel représentent une source prédominante de production de gaz de pétrole liquéfiés (GPL), contribuant à plus de 60% de cette ressource. En général, l'extraction du gaz naturel révèle une composition typique comprenant environ 90% de méthane (CH_4), accompagné de 5% de propane et de 5% d'autres gaz, incluant le butane.

Ce processus de production commence par la séparation des différents composants du gaz naturel, obtenu par un procédé de refroidissement. Ainsi, les fractions de GPL, principalement constituées de butane et de propane à l'état liquide, sont séparées du méthane restant à l'état gazeux, ces différents gaz ayant des points de liquéfaction distincts.

Parallèlement, lors de l'extraction de pétrole, des quantités variables de butane et de propane sont également récupérées sous forme de gaz dissous, enrichissant ainsi les ressources en GPL. Toutefois, les proportions spécifiques de ces composés varient considérablement d'un gisement à un autre, ajoutant une complexité à ce processus de production. [10]

II.3.2. L'obtention du GPL à partir des raffineries

II.3.2.1. La production du GPL à partir du Topping

La distillation atmosphérique, premier maillon de la chaîne de transformation du pétrole brut au sein des raffineries, opère une séparation minutieuse des divers composants en fractions distinctes, en se fondant sur leurs propriétés d'ébullition. [13]

Ce procédé, déployé dans une colonne de distillation, se déroule à des températures élevées, provoquant l'évaporation sélective des différentes fractions du pétrole brut. Par des soutirages latéraux stratégiquement positionnés le long de la colonne, les fractions les plus légères, telles que le gaz naturel, l'essence et les gaz de pétrole liquéfiés (GPL), sont récupérées en partie haute de la colonne, grâce à leur point d'ébullition inférieur, tandis que les fractions plus lourdes, comme le diesel et les résidus, sont collectées en partie basse.

Le GPL, en raison de sa nature légère, émerge ainsi des coupes supérieures obtenues par ce processus. Cette récupération stratégique du GPL revêt une importance capitale dans la production globale de la raffinerie, en fournissant une source d'énergie précieuse pour une multitude d'applications contribuant ainsi de manière significative à répondre aux besoins énergétiques de la société moderne.

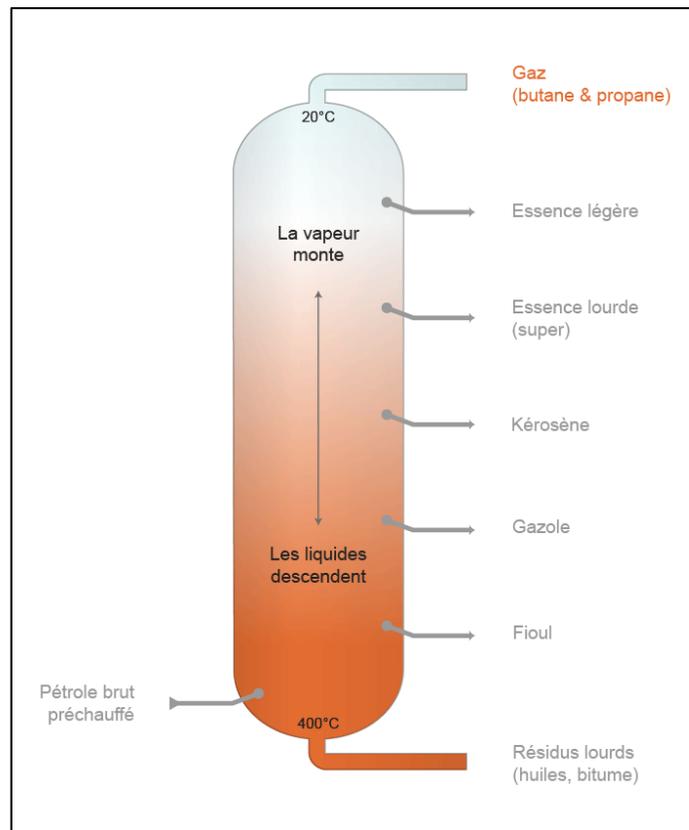


Figure II-2 Schéma d'obtention des coupes pétrolières à partir du Topping. [10]

II.3.2.2. La production du GPL à partir du reforming catalytique

Le reforming catalytique, une méthode raffinée utilisée dans les installations pétrolières, opère une transformation des hydrocarbures lourds en des composés plus légers et précieux, tels que l'essence. Ce processus s'effectue à des températures élevées en présence de catalyseurs spécialisés, lesquels induisent une réorganisation moléculaire. [16]

Contrairement au craquage, qui fracture les molécules en produits plus simples, le reforming catalytique se concentre sur la reconfiguration des molécules existantes pour produire des fractions plus légères et hautement valorisées.

Bien que son objectif principal soit la production d'essence de qualité supérieure, il génère également des fractions de gaz de pétrole liquéfiés en tant que sous-produits. Ces fractions de GPL, telles que le propane et le butane, sont récupérées, purifiées puis commercialisées pour une variété d'utilisations, offrant ainsi une diversification des produits raffinés et contribuant à répondre aux besoins énergétiques croissants. [16]

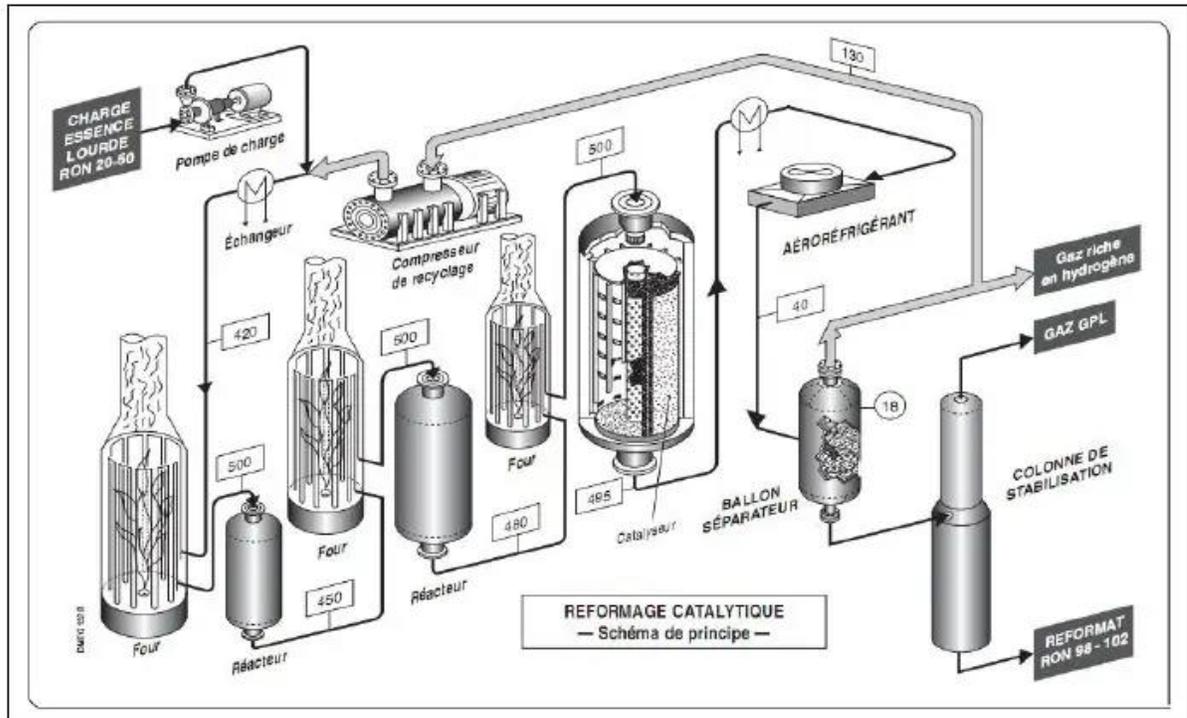


Figure II-3 Schéma d'obtention du GPL à partir du reforming catalytique.

II.3.2.3. La production du GPL à partir du craquage catalytique :

Le craquage catalytique, un processus de transformation chimique sophistiqué employé dans les raffineries pétrolières, a pour dessein de convertir les fractions d'hydrocarbures lourdes en produits plus légers et de plus grande valeur, incluant les essences et les gaz de pétrole liquéfiés (GPL). [6]

Il repose sur l'utilisation de catalyseurs spécifiques pour accélérer la rupture des liaisons moléculaires des hydrocarbures lourds, engendrant ainsi des fractions plus légères, telles que le propane et le butane. Cette technique, soumise à des conditions de température et de pression optimisées, vise à maximiser le rendement en produits désirés tels que les essences et les GPL tout en minimisant la production de sous-produits indésirables passant par 3 sections :

- **La Section Réactionnelle :**

Elle constitue le cœur opérationnel de l'unité RFCC. C'est en ce lieu que s'accomplit le craquage catalytique fluide, où les fractions les plus denses du pétrole brut sont soumises à des températures élevées en présence de catalyseurs spécifiques.

Sous l'influence combinée de la chaleur et des catalyseurs, les molécules d'hydrocarbures de grande taille sont fragmentées en molécules plus petites et plus légères, telles que l'essence, le diesel et les GPL.

- **La Section Fractionnement et Stabilisation :**

Après le processus de craquage dans la section réactionnelle, la section de fractionnement et de stabilisation prend le relais où les produits résultants sont dirigés vers cette phase pour y être séparés en différentes fractions plus volatiles.

- **La Section Traitement Chimique :**

La troisième composante, la section de traitement chimique, se charge du traitement des gaz et des effluents engendrés pendant le processus de craquage.

Ces gaz et effluents sont soumis à des procédés de traitement visant à éliminer les contaminants et à se conformer aux normes environnementales et réglementaires en vigueur.

Une fois obtenues, les fractions de GPL sont soumises à un processus de séparation et de purification avant d'être mises sur le marché pour diverses applications.

En définitive, le craquage catalytique revêt une importance capitale dans l'approvisionnement en gaz de pétrole liquéfiés, contribuant ainsi à répondre à la demande croissante en énergies alternatives et en produits pétroliers raffinés.

Il convient de mentionner que certaines installations utilisent différentes techniques de stockage, telles que le stockage dans des sphères à des pressions variables entre 12,5 et 14,5 bars, ou encore le stockage comme combustible gazeux dans des réservoirs cylindriques.

L'extension de la capacité de stockage en surface pour accueillir d'importants volumes excédentaires de GPL est à écarter en raison de ses coûts élevés et de l'incertitude quant aux quantités de GPL à stocker. Quant aux techniques de stockage souterrain actuellement utilisées dans le monde, elles peuvent sembler difficiles à envisager en raison des investissements substantiels qu'elles requièrent.

Certains experts de la société SONATRACH suggèrent un procédé de stockage consistant à réinjecter le GPL sous forme liquide dans le gisement de gaz où il est produit, à l'aide d'un ou plusieurs puits injecteurs de GPL liquide. Cette approche permet de stocker d'importantes quantités de GPL avec un investissement minimal, ainsi que la possibilité de déstocker à tout moment. [15]

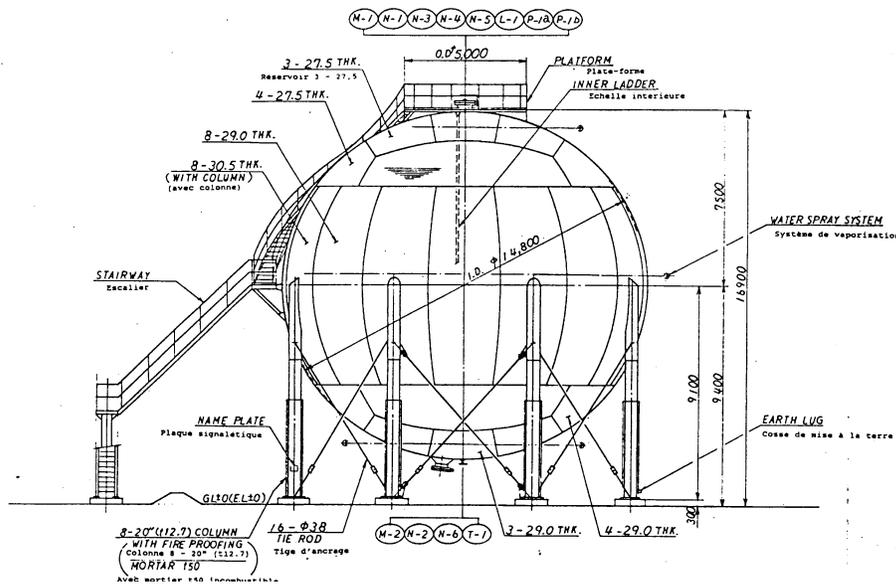


Figure II-5 Stockage du GPL dans des sphères. [15]

II.5. L'utilisation du GPL.

Dotés d'un pouvoir calorifique remarquable, d'une pureté exceptionnelle et d'une combustion propre, les Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) sont une source d'énergie inégalée, apte à répondre à une multitude de besoins. Leur commodité de transport en fait un choix privilégié dans les secteurs industriels, commerciaux, domestiques et récréatifs. En outre,

les GPL remplissent divers rôles, à la fois comme gaz combustible et comme carburant pour les véhicules automobiles, tout en servant également de matière première précieuse dans l'industrie pétrochimique. [10]

II.5.1. Dans la pétrochimie.

- **Le propane :**

Dans le domaine de la pétrochimie, le propane assume diverses fonctions cruciales :

Usage Domestique Primaire : Traditionnellement dédié à un usage domestique en tant que combustible pour le chauffage et la cuisson dans les foyers.

Utilisation Industrielle : Nonobstant son utilisation prédominante dans les ménages, l'industrie pétrochimique consacre 18% de la production de propane à des fins industrielles.

Synthèse d'Acétaldéhyde, Formaldéhyde et Acide Acétique : Par le biais d'une réaction d'oxydation, le propane est transformé en acétaldéhyde, formaldéhyde et acide acétique, des composés chimiques essentiels dans de nombreux processus industriels.

Production d'Éthylène et de Propylène : Le propane est également soumis à une pyrolyse pour générer de l'éthylène et du propylène, qui sont des précurseurs fondamentaux dans la production de plastiques et de fibres synthétiques.

Fabrication de Nitroéthane et Nitropropane : Enfin, le propane est employé dans la synthèse de nitroéthane et nitropropane par le biais d'une réaction de nitration, utilisés dans diverses applications industrielles et chimiques.

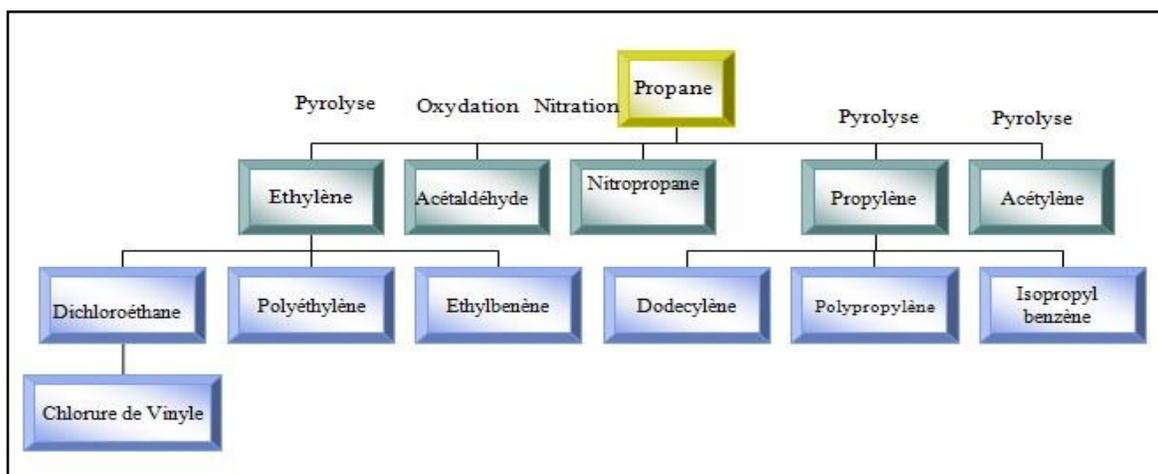


Figure II-6 Les Principales transformations du propane dans la pétrochimie.

- **Le butane :**

En ce qui concerne le butane, plusieurs points méritent d'être soulignés :

Utilisation Principale dans la Fabrication d'Essences : Le butane est principalement utilisé dans l'industrie pour la fabrication d'essences, qui sont des composants clés des carburants et des produits chimiques.

Production d'Alkylats avec l'Isobutane : L'isobutane est employé spécifiquement dans le processus de production d'alkylats, qui sont des composés utilisés dans diverses applications industrielles et chimiques.

Mélange avec le N-butane pour Ajuster la Tension de Vapeur : Le n-butane est mélangé directement avec d'autres composés, notamment dans le pool essence, pour réguler la tension de vapeur, assurant ainsi une combustion optimale dans les moteurs à combustion interne.

Production de Butadiène par Déshydrogénation : Le butane est également utilisé dans le processus de déshydrogénation pour produire du butadiène, un composé chimique essentiel dans la fabrication de caoutchouc synthétique.

Synthèse d'Anhydride Maléique par Oxydation : Une autre application du butane est sa conversion en anhydride maléique par oxydation, qui est utilisé dans la production de plastiques, de résines et d'autres produits chimiques.

Utilisation de l'Iso Butylène pour la Fabrication de Produits Divers : L'iso butylène, produit lors de la déshydrogénation de l'isobutane, est une matière première importante pour la fabrication de plastiques, de caoutchouc et de produits pharmaceutiques et cosmétiques.

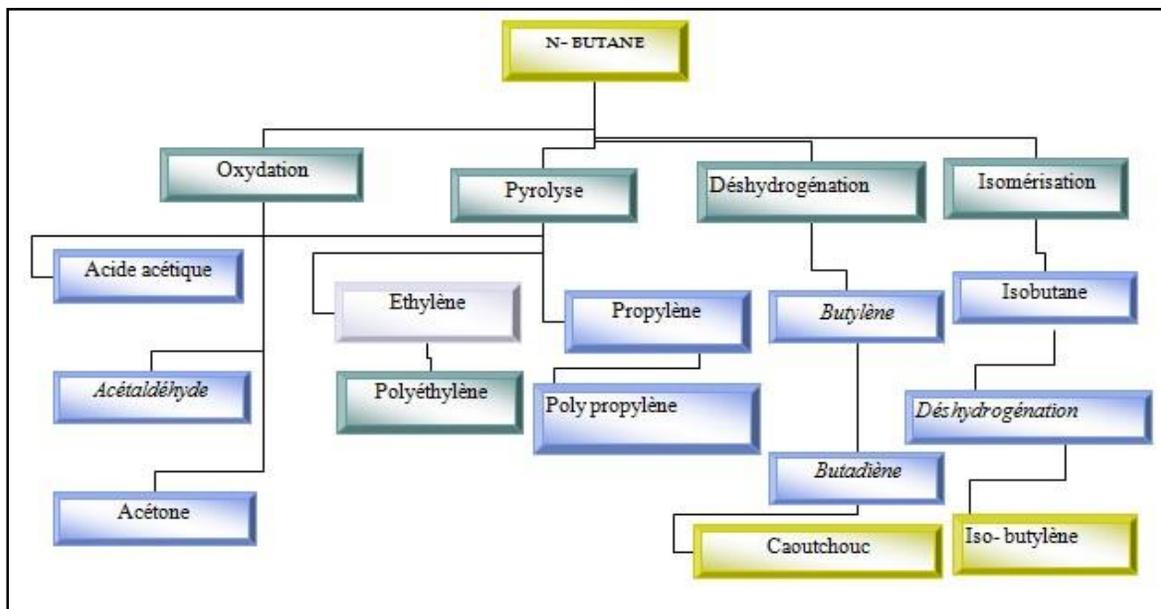


Figure II-7 Les Principales transformations du butane dans la pétrochimie.

II.5.2. Utilisations domestiques :

- **La cuisine :**

La pratique de la cuisine constitue l'une des activités fondamentales les plus énergivores à l'échelle planétaire. Dans les régions industrialisées, les consommateurs ont fréquemment la possibilité de choisir entre différents types d'appareils de cuisson, notamment des cuisinières ou des fours fonctionnant au butane ou au propane, désignés communément sous le terme de Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL), ainsi que le gaz naturel ou l'électricité. En revanche, dans les pays en développement, une grande partie de la population recourt à l'utilisation de combustibles locaux tels que le bois, les résidus de récolte ou les déjections animales, entraînant des répercussions néfastes tant sur la santé publique, en raison de l'exposition à des particules, des produits chimiques et des suies, que sur l'environnement, notamment par le biais de la déforestation.

La fiabilité et la versatilité des GPL en font un choix largement répandu, même dans les établissements tels que les hôtels et les restaurants. Ils garantissent une chaleur instantanée dès l'allumage, éliminant ainsi la nécessité d'une période de préchauffage, et offrent une alternative moderne aux combustibles de cuisson traditionnels. De surcroît, la combustion des GPL s'opère sans émission de fumées noires, préservant ainsi les ustensiles de cuisine de toute souillure et facilitant leur nettoyage ultérieur.

- **Le chauffage :**

Les habitations, ainsi que les établissements hôteliers, requièrent une source d'énergie fiable pour un éventail d'applications, telles que le chauffage central, la production d'eau chaude, le chauffage des piscines, voire la climatisation, en plus des besoins de cuisson. Les Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) sont en mesure de répondre à tous ces besoins de manière adéquate. De plus, ils présentent l'avantage supplémentaire de garantir aux particuliers et aux entreprises une alimentation énergétique constante, sans risque de coupures ou de variations imprévues.



Figure II-8 L'utilisation du GPL pour le chauffage.

- **La climatisation :**

Dans le contexte de la climatisation, que ce soit dans les climatiseurs ou les réfrigérateurs, deux approches différentes sont mises en œuvre :

Le GPL se détend pour absorber la chaleur de l'environnement, provoquant ainsi son évaporation et créant un effet de fraîcheur.

Un moteur fonctionnant au GPL peut entraîner un compresseur chargé de comprimer le gaz GPL, contribuant ainsi à la production de froid.

II.5.3. Utilisations industrielles

Le propane trouve une utilité étendue dans divers secteurs industriels, participant à une multitude de processus de fabrication, qu'ils soient exécutés manuellement ou de manière mécanisée. Sa versatilité lui permet de s'adapter aussi bien aux installations industrielles de grande envergure qu'aux structures de moindre taille.

Dans le domaine de la climatisation industrielle, le propane est mobilisé pour des opérations de refroidissement à grande échelle. Il joue également un rôle crucial dans la production de carburants, répondant ainsi aux impératifs énergétiques. Les centrales électriques tirent avantage de sa combustion comme source d'énergie pour la génération électrique.

- **Dans l'industrie chimique :**

- Il est utilisé pour chauffer les bacs d'acide, facilitant ainsi divers processus de fabrication.
- Il est un composant essentiel dans la composition d'insecticides, participant ainsi à la lutte contre les nuisibles.
- Le propane constitue un ingrédient majeur dans la synthèse du caoutchouc synthétique, matériau de base dans la production de nombreux articles en caoutchouc.
- Il est également utilisé dans la production d'aérosols, offrant des solutions pratiques dans diverses applications industrielles.
- De plus, le propane est employé pour la production de gaz inertes, indispensables dans différents processus industriels.

- **Dans le secteur des matières plastiques :**

- Il est employé pour ramollir les matières plastiques avant leur mise en forme.
- Dans le processus d'enrobage d'objets métalliques, le propane est utilisé pour le préchauffage, assurant ainsi une meilleure adhérence des revêtements.
- Enfin, le propane est sollicité dans le travail au chalumeau, notamment lors des opérations de soudage et de découpe des métaux.

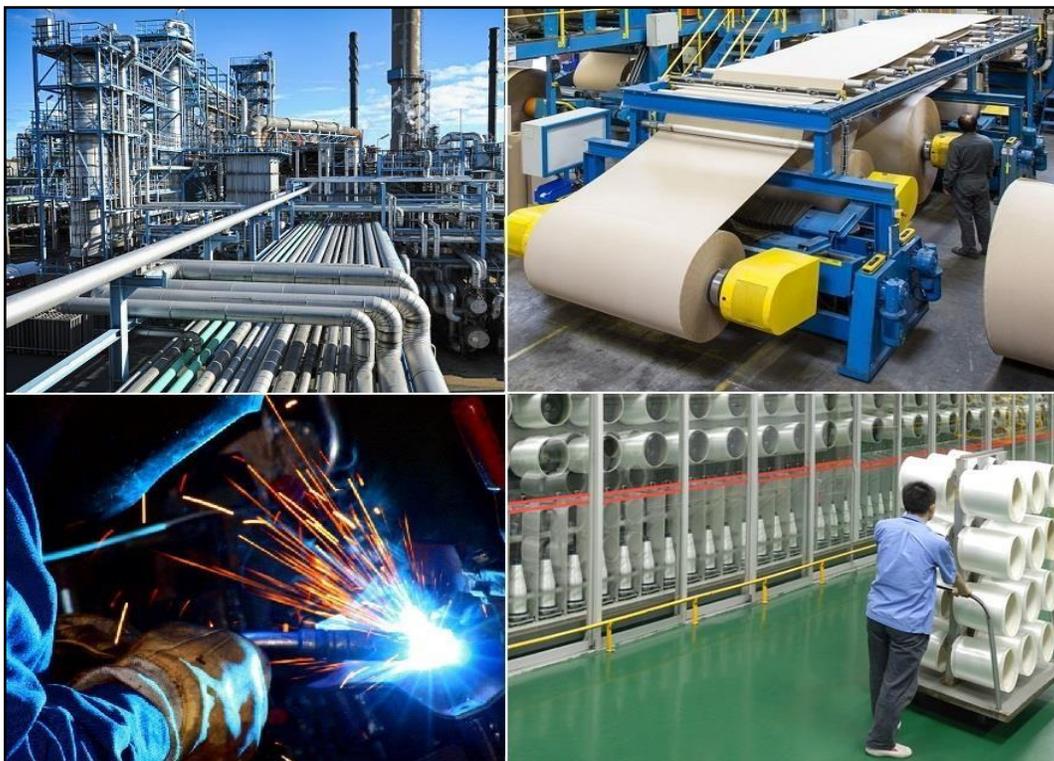


Figure II-9 Les utilisations industrielles du GPL.

II.5.4. Utilisation comme carburant (GPL_C).

Les Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) sont non seulement prisés en tant que combustible pour les véhicules, mais également pour une gamme étendue d'autres moyens de transport, incluant les bateaux de plaisance, les montgolfières, ainsi que les chariots élévateurs. Cette diversité d'applications est attribuable à leur capacité à préserver les performances des véhicules et à réduire l'usure du moteur. En témoigne la consommation mondiale de près de 20 millions de tonnes de GPL comme carburant en 2010.

L'intérêt majeur du GPL carburant réside dans ses émissions de polluants remarquablement faibles par rapport aux carburants conventionnels tels que l'essence et le gazole. Cette caractéristique contribue significativement à la réduction de l'impact environnemental et des risques pour la santé humaine, tout en jouant un rôle essentiel dans la limitation des émissions de gaz à effet de serre.

En Algérie, le GPL carburant est largement adopté sous l'appellation commerciale «SIRGAZ», soulignant ainsi son importance et sa reconnaissance sur le marché national.



Figure II-10 Utilisation du GPL comme carburant.

II.5.5. Utilisation pour la production d'électricité.

Dans le domaine de la production électrique, le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) se démarque par ses qualités techniques remarquables, permettant d'atteindre des niveaux de rendement très élevés. Sa nature propre et ses faibles émissions le positionnent comme une option écologique de premier choix. En outre, sa polyvalence et sa disponibilité en font un élément clé dans la diversification des sources d'énergie et dans la garantie d'un approvisionnement fiable en électricité.

II.5.6. Utilisation dans le secteur agricole.

Dans le domaine agricole, l'utilisation du Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) se concentre principalement sur des applications spécifiques telles que l'aviculture et certaines cultures en serre.

Bien que la consommation prévue soit relativement modeste à court terme, environ 40 000 tonnes par an, une évolution significative est anticipée à moyen et long terme. Cette croissance future sera notamment favorisée par l'introduction du GPL dans divers aspects de l'élevage avicole et porcin, ainsi que dans des procédés tels que le chauffage des installations d'élevage, le séchage des céréales avant leur stockage en silos, et le séchage des récoltes.

De plus, le GPL offre une alternative prometteuse aux produits chimiques pour le désherbage thermique, contribuant ainsi à une agriculture plus durable.

En conséquence, les Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) peuvent jouer un rôle essentiel dans le développement et la modernisation du secteur agricole.



Figure II-11 L'utilisation du GPL dans le secteur agricole.

II.5.7. Utilisations itinérantes

Les utilisations itinérantes du Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) se révèlent être des solutions pratiques et polyvalentes pour une gamme diversifiée d'utilisations en déplacement. Ces utilisations se distinguent par leur mobilité et leur adaptabilité, offrant ainsi une source d'énergie fiable et efficace dans des situations où une alimentation fixe n'est pas disponible ou pratique. Parmi ces usages nomades, les bouteilles de GPL sont largement utilisées dans le secteur de la restauration en plein air, offrant aux chefs et aux cuisiniers une source de flamme instantanée et contrôlable pour la préparation des repas en extérieur. De même, les briquets au GPL fournissent une solution pratique pour l'allumage de cigarettes, de feux de camp ou de barbecues en plein air, garantissant ainsi une flamme constante et fiable dans diverses conditions environnementales. En outre, les lampes au GPL jouent un rôle crucial dans la fourniture d'éclairage mobile lors d'activités nocturnes en extérieur, telles que le camping, la randonnée ou les événements en plein air. Leur conception portable permet une utilisation aisée dans des environnements où l'électricité n'est pas disponible, offrant ainsi une source lumineuse fiable et sûre. En somme, les utilisations itinérantes du GPL incarnent une solution énergétique efficace et

pratique, répondant aux besoins de mobilité et d'adaptabilité dans une variété de contextes et d'activités en déplacement.



Figure II-12 Utilisations itinérantes du GPL.

II.6. La demande nationale en GPL

Le niveau de la demande nationale des GPL est de l'ordre de 1.4 millions de tonnes dont 90 % de butane, 5 % de propane et 5 % de GPL carburant (GPL/c). [2]

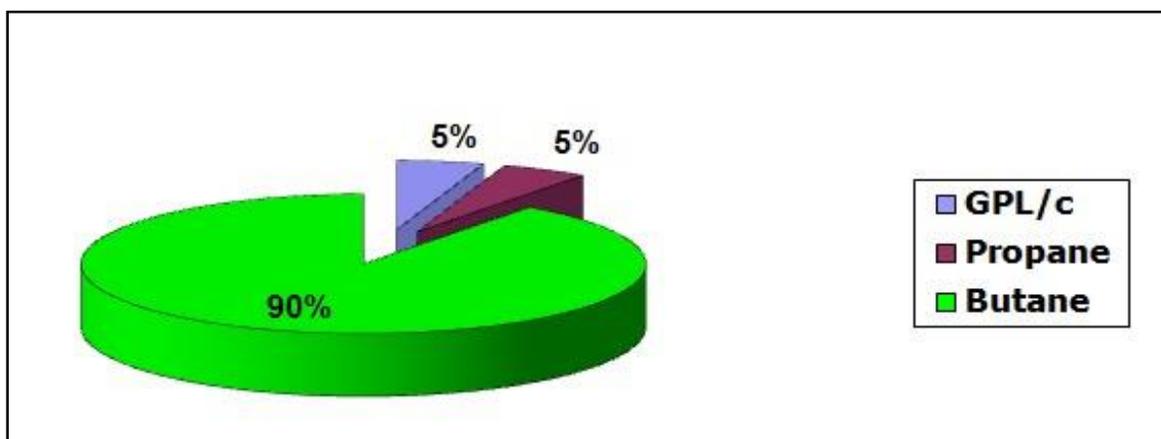


Figure II-13 La demande nationale en GPL.

Elle est répartie comme suit :

- 36.000 tonnes (24 %) dans la région Ouest.
- 516.000 tonnes (37 %) dans la région Est.
- 401.000 tonnes (29 %) dans la région Centre.
- 47.000 tonnes (10%) au Sud.

II.7. La consommation nationale du GPL

Les plus récentes données statistiques relatives à la consommation de combustibles en Algérie révèlent une mutation significative dans les habitudes des consommateurs, témoignant d'une tendance croissante à l'adoption du Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL). Cette évolution se caractérise par une hausse notable de l'utilisation du GPL, principalement dans le secteur domestique, avec une augmentation chiffrée à environ 2%. Parallèlement, l'usage du GPL en tant que carburant connaît une ascension spectaculaire, marquant une progression remarquable de l'ordre de 40%. Cette tendance émergente suscite un intérêt accru, notamment en raison de son potentiel à alléger la dépendance énergétique nationale vis-à-vis des importations de combustibles et de produits pétroliers raffinés, dont la facture annuelle s'élève à plus d'un milliard de dollars. En effet, cette transition vers le GPL offre des perspectives prometteuses quant à la réduction des coûts liés aux importations, tout en favorisant une meilleure maîtrise des ressources énergétiques nationales. [1]

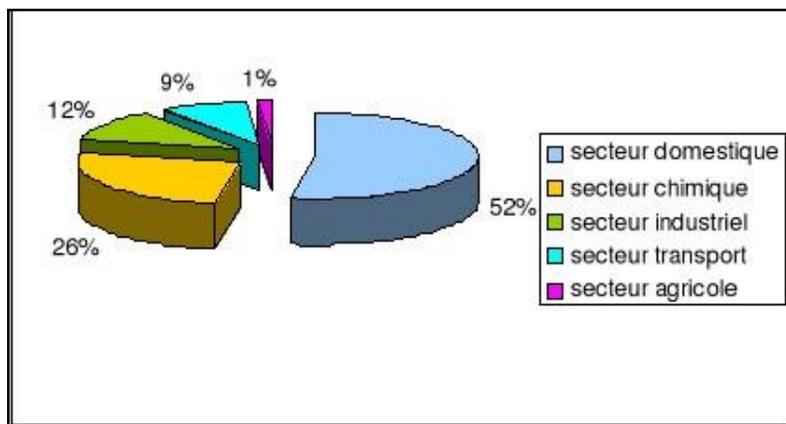


Figure II-14 La consommation du GPL par secteur.

II.8. Les avantages et les inconvénients du GPL

II.8.1. Les avantages du GPL

Les gaz butane et propane, communément désignés sous l'appellation de GPL, se distinguent comme une forme énergétique remarquable en vertu de leurs origines, de leurs propriétés intrinsèques et de leur diversité d'applications. En qualité de source énergétique moins néfaste pour l'environnement, caractérisée par une émission de CO₂ modérée, une performance avérée et une orientation novatrice, les GPL confèrent de multiples avantages tant aux consommateurs qu'aux secteurs professionnels, tout en contribuant sans délai à instaurer et à maintenir un modèle énergétique durable, concurrentiel et plus sécurisé. [10]

Ces avantages sont présentés en dessous :

➤ **La propreté :**

Les GPL peuvent apporter une contribution significative et immédiate à l'amélioration de la qualité de l'air, d'une part par l'adoption du GPL comme carburant dans le secteur automobile, et d'autre part par le remplacement du bois et du kérosène par des GPL pour les besoins de cuisson et de chauffage.

Cette transition permet de réduire de 15% les émissions de gaz à effet de serre par rapport au chauffage au fioul. Les GPL se distinguent comme l'une des rares sources énergétiques conventionnelles disponibles universellement et se caractérisent par leur propreté, générant moins de gaz à effet de serre que l'essence, le diesel et l'électricité d'origine thermique. Ils contribuent significativement à la diminution des polluants tels que les oxydes d'azote et les hydrocarbures, ainsi qu'à la réduction des émissions de CO₂.

Étant principalement issus des gisements de gaz naturel, les GPL présentent l'avantage d'être non toxiques et de ne pas impacter les sols, les ressources en eau et les nappes phréatiques.

Tableau II-3 La différence des émissions entre le GPL et l'essence.

Constituants des gaz d'échappement	Essence	GPL
Monoxyde de carbone (CO)	15%	3.1%
Hydrocarbures imbrulés (HC)	2.2%	1.6%
Oxydes d'azote (NO _x)	1.7%	1.5%

➤ **La performance :**

La performance énergétique des GPL trouve son fondement dans leur remarquable pouvoir calorifique, surpassant celui des autres formes d'énergie fréquemment employées telles que le charbon, le gaz naturel, le fioul, le diesel, l'essence et les biocarburants. Ce pouvoir calorifique accru se traduit par une libération plus conséquente de chaleur lors de la combustion d'une flamme de GPL, ce qui se répercute directement sur leur performance énergétique globale. En effet, cette capacité à produire une chaleur plus intense par unité de volume combustible confère aux GPL un avantage substantiel en termes d'efficacité énergétique, renforçant ainsi leur positionnement comme une source énergétique de choix.

Dans le tableau en dessous, on va résumer l'équivalence thermique du propane en termes de quantité de chaleur dégagée.

Tableau II-4 L'équivalence thermique du propane.

1Kg de propane				
Bois 3 à 6 Kg	Charbon 1,5 à 2 Kg	Fioul 1,29 L	Gaz naturel 1,16 m ³	Electricité 1,38 KWh

Le rendement de combustion des GPL peut surpasser jusqu'à cinq fois celui des combustibles traditionnels, engendrant ainsi une diminution notable du gaspillage énergétique et une optimisation accrue des ressources de notre planète. Cette supériorité dans l'efficacité de combustion se traduit par une utilisation plus efficace de l'énergie disponible, permettant une réduction significative des pertes calorifiques et une exploitation plus judicieuse des ressources naturelles. [10]

➤ **L'innovation :**

Les GPL se distinguent en tant que source d'énergie propice à l'innovation, en raison de leur capacité à favoriser la production locale d'électricité. Ils sont largement employés

dans le secteur agricole, aussi bien comme carburant pour les véhicules agricoles que comme agent insectifuge. En qualité d'énergie à la fois moderne et respectueuse de l'environnement, les GPL revêtent une importance cruciale dans le développement de l'agriculture, notamment en remplaçant les produits chimiques dans des applications telles que la désinfection des étables ou le traitement des mauvaises herbes. Cette diversité d'applications témoigne de leur polyvalence et de leur potentiel d'innovation dans différents domaines, contribuant ainsi à une transition vers des pratiques agricoles plus durables et écologiques.

➤ Le transport :

Les GPL présentent l'avantage d'être aisément transportables, ne requérant point d'infrastructures spécifiques pour leur acheminement. Ainsi, ils constituent souvent l'unique source énergétique disponible dans les îles, en régions montagneuses ou même lors de situations de crise telles que les catastrophes naturelles. Leur facilité de stockage et d'utilisation les rend praticables quasiment partout dans le monde, tandis que leurs réserves sont garanties pour plusieurs décennies à venir. Dans les contrées reculées ou peu accessibles aux réseaux de gaz naturel, les GPL répondent efficacement aux besoins énergétiques, que ce soit en tant que source principale ou en complément des énergies renouvelables. [10]

➤ Le stockage :

Les GPL se prêtent aisément au stockage, souvent réalisé sous la forme de bouteilles de gaz, et sont principalement employés pour répondre aux besoins énergétiques en matière de cuisson, de chauffage d'appoint ou encore de mobilité. Ces bouteilles, d'une capacité allant de 1 à 35 kg, se déclinent en une gamme variée de formes et de teintes, offrant ainsi une solution flexible et adaptée à une diversité de contextes d'utilisation.

II.8.2. Les avantages du GPL au tant que carburant

La promotion du GPL dans le domaine du transport est essentiellement motivée par les considérations environnementales, étant donné que ce combustible présente des caractéristiques écologiques supérieures à celles des carburants conventionnels.

- Le fonctionnement du moteur utilisant du GPL est notablement plus discret, et les vibrations sont réduites par rapport aux carburants traditionnels. De plus, la combustion du GPL ne laisse aucun résidu, ce qui prolonge la durabilité du

moteur et du lubrifiant. Les intervalles de révision peuvent ainsi être espacés jusqu'à 30 000 km.

- L'installation d'un système GPL est soumise à des normes de sécurité rigoureuses, incluant des spécifications précises concernant la nature et l'emplacement des réservoirs, ainsi que l'homologation des équipements utilisés.
- Du point de vue économique, le GPL présente des avantages indéniables : son prix au litre est le plus bas sur le marché, généralement environ la moitié de celui de l'essence sans plomb et au moins 30 % moins cher que celui du diesel. De plus, les incitations fiscales peuvent couvrir tout ou partie du surcoût par rapport à une version essence, rendant les coûts globaux souvent inférieurs à ceux du diesel.

II.8.3. Les inconvénients du GPL

Malgré les avantages des GPL dans plusieurs domaines, ils présentent aussi des inconvénients cités en dessous : [10]

- La persistance d'un risque de fuite et d'ignition du mélange en cas de collision demeure une préoccupation importante.
- Un inconvénient substantiel lié à l'encombrement, où la présence du réservoir peut réduire significativement le volume du coffre. Toutefois, pour pallier cette contrainte, les constructeurs incluent dès la phase de conception de leurs modèles des versions intégrant un réservoir GPL, limitant ainsi l'impact sur l'espace de chargement.
- L'alimentation au GPL entraîne certes une élévation de la viscosité de l'huile moteur, toutefois, elle induit également une oxydation accrue du lubrifiant, conséquence de la chaleur générée, supérieure à celle observée avec l'essence, et favorisée par l'absence d'isolation sur certaines pièces, notamment les dépôts sur la tête du piston.

Chapitre.III. Désulfuration du GPL

III.1. Introduction

La désulfuration du GPL par solution d'amine constitue une étape cruciale dans le processus de raffinage, visant à éliminer les impuretés soufrées du gaz de pétrole liquéfié (GPL).

Ce procédé repose sur une interaction chimique simple : les amines, des composés chimiques spéciaux, captent les composés soufrés présents dans le GPL et les rendent solubles dans l'eau, permettant ainsi leur élimination.

Une fois purifié, le GPL peut être utilisé en toute sécurité. Ensuite, la solution d'amine est traitée pour séparer les impuretés soufrées, et les amines sont réutilisées pour purifier davantage de GPL.

Ce processus est essentiel pour garantir la qualité et la conformité du GPL aux normes de sécurité et de pureté.

III.2. Problèmes liés à la présence du soufre dans le GPL

La présence de soufre dans le gaz liquéfié de pétrole (GPL) peut poser divers problèmes aux exploitants et avoir des répercussions sur l'environnement ainsi que sur la santé publique. En effet, le soufre, notamment sous forme de composés soufrés tels que le sulfure d'hydrogène (H_2S) et les mercaptans, est souvent présent dans le GPL. Ces composés soufrés peuvent être particulièrement problématiques en raison de leur toxicité et de leurs effets néfastes sur l'environnement. [18]

Lorsque le GPL contenant du soufre est manipulé ou utilisé dans des installations, il peut engendrer des problématiques diverses qui varient en fonction des conditions de température et de pression prévalant dans l'installation.

On peut citer quelques problèmes en dessous : [17]

1/ La corrosion des équipements : La présence de soufre dans le gaz liquéfié de pétrole (GPL) peut avoir des effets néfastes sur la corrosion des équipements industriels. Lorsque le soufre réagit avec les composants métalliques des équipements, il peut provoquer leur détérioration progressive. Cette réaction chimique conduit à des dommages structurels, tels que la formation de fissures et de pitting ("Pitting" fait référence à un type de corrosion localisée où des cavités ou des trous se forment dans la surface métallique, souvent de manière irrégulière), compromettant ainsi l'intégrité des équipements. De plus, la corrosion causée par le soufre peut entraîner une diminution de la durabilité des équipements, nécessitant des réparations fréquentes et coûteuses, ainsi qu'un remplacement anticipé. Ces conséquences soulignent l'importance cruciale de contrôler étroitement la composition du GPL pour réduire la teneur en soufre et prévenir les

dommages liés à la corrosion, assurant ainsi la fiabilité et la sécurité des installations industrielles.

2/ L'empoisonnement du catalyseur : Comme il est mentionné dans le chapitre précédent, le GPL, il est possible de l'utiliser comme matière première dans les procédés pétrochimiques pour la synthèse d'Acétaldéhyde, formaldéhyde et l'acide acétique et d'autres.

Les impuretés contenant du soufre sont des poisons pour les catalyseurs utilisés dans ces procédés. Le soufre peut inhiber l'activité catalytique des catalyseurs utilisés dans divers processus chimiques, compromettant ainsi leur efficacité et leur rendement.

Pour le GPL-C : Le pot catalytique, également appelé catalyseur d'échappement, est un composant essentiel des véhicules fonctionnant au GPL, tout comme des véhicules fonctionnant à l'essence ou au diesel. Son rôle principal est de réduire les émissions polluantes provenant du moteur en catalysant certaines réactions chimiques.

Cependant, le H_2S dans le GPL carburant peut poser un problème pour le pot catalytique. Le H_2S est un contaminant potentiellement nocif pour le pot catalytique car il peut être oxydé en soufre (S) sur le catalyseur, formant du dioxyde de soufre (SO_2) qui peut endommager le catalyseur.

Juste qu'il faut mentionner que pour préserver l'efficacité du pot catalytique malgré la présence de H_2S , il est primordial d'utiliser du GPL de haute qualité à faible teneur en H_2S . Certains systèmes de conversion intègrent des filtres pour éliminer les impuretés, assurant ainsi le bon fonctionnement du pot catalytique et du système d'échappement.

3/ La pollution de l'atmosphère : La présence de soufre dans le gaz liquéfié de pétrole (GPL) peut avoir des répercussions considérables sur l'environnement. Les émissions de gaz contenant du soufre, notamment le sulfure d'hydrogène (H_2S) et les mercaptans présents dans le GPL, contribuent à la pollution atmosphérique en générant des oxydes de soufre (SO_x). Ces SO_x sont responsables de la formation de particules fines et de smog, ce qui entraîne des problèmes de qualité de l'air et des impacts sur la santé respiratoire des populations environnantes.

En outre, les émissions de SO_x provenant de la combustion du GPL contribuent à la formation de pluies acides, exacerbant les effets néfastes sur l'environnement. L'acidification des sols et des eaux due aux SO_x peut avoir des conséquences dévastatrices sur les écosystèmes terrestres et aquatiques. Cela peut entraîner une diminution de la biodiversité, des dommages aux cultures agricoles et une perturbation des cycles naturels, mettant en péril la durabilité des écosystèmes et la sécurité alimentaire. Ainsi, la présence de soufre dans le GPL souligne l'importance cruciale de réduire les émissions de SO_x pour préserver la santé environnementale et assurer la pérennité des écosystèmes.

4/ La toxicité pour les opérateurs de l'usine : Le sulfure d'hydrogène (H_2S), fréquemment présent dans le GPL, est un gaz toxique même à de faibles concentrations, caractérisé par une odeur d'œuf pourri pouvant ne pas être perçue à des niveaux dangereux. L'exposition à ce gaz peut entraîner une perte de conscience, des difficultés respiratoires et, à des concentrations élevées, le décès en quelques minutes seulement. Les travailleurs œuvrant dans les installations de traitement du GPL sont particulièrement exposés aux risques liés au H_2S lors de la manipulation et du traitement du gaz, ce qui nécessite une vigilance accrue et des mesures de protection adéquates.

D'autre part, les mercaptans parmi lesquels le méthyle mercaptan, représentent une préoccupation majeure pour la santé humaine, même à des concentrations modérées. Leur inhalation peut entraîner divers effets nocifs, tels que des irritations des voies respiratoires, des maux de tête et des nausées, signalant ainsi une exposition à ces composés. De manière plus inquiétante, une exposition chronique aux mercaptans peut avoir des conséquences plus graves, notamment des troubles neurologiques et des dommages au foie, mettant en lumière l'importance cruciale de limiter l'exposition à ces substances toxiques et de mettre en place des mesures de prévention efficaces pour protéger la santé des individus.

Ces problèmes associés à la présence de soufre dans le GPL soulignent l'importance de surveiller et de contrôler étroitement la composition du GPL utilisé dans les installations industrielles pour garantir la sécurité des travailleurs, prévenir les dommages environnementaux et protéger la santé publique.

III.3. Les méthodes de désulfuration du GPL

Diverses méthodes, par leur ingéniosité et leur sophistication, ont été développées pour entreprendre la désulfuration des hydrocarbures et des gaz. Parmi celles-ci l'absorption, l'hydrotraitement, l'extraction par solvant, l'oxydation catalytique et d'autres techniques novatrices se distinguent par leur efficacité et leur adaptabilité. Chacune de ces méthodes, empreintes de complexité technique et de raffinement conceptuel, vise à neutraliser les divers composés soufrés présents dans les flux à traiter, s'adaptant ainsi aux exigences spécifiques de chaque application industrielle.

III.3.1. La désulfuration du GPL par absorption

L'absorption consiste en la mise en contact d'un mélange gazeux, appelé **soluté**, avec un liquide, désigné comme **solvant**, dans le dessein de solubiliser de manière privilégiée un composé spécifique. Cette procédure requiert un **transfert de matière** de la phase

gazeuse vers la phase liquide, que ce soit sans réaction chimique, ce que l'on nomme **absorption physique**, ou avec une réaction chimique, qualifiée d'**absorption chimique**, dans le dessein de modifier l'équilibre thermodynamique et d'encourager le transfert de matière entre ces phases. La récupération, souvent inévitable, de la substance dissoute dans le liquide est connue sous le terme de **désorption**. La désorption des composés se produit lors du transfert de la phase liquide vers la phase gazeuse. [19]

Il existe deux types d'absorption, qui sont :

✓ **L'absorption chimique :**

L'absorption chimique s'opère par l'action de gradients de pression partielle entre les gaz acides présents dans la phase gazeuse et les solvants chimiques sélectionnés. Ces derniers, agissant comme des bases faibles, absorbent les gaz acides, entraînant une réaction énergétique exothermique. Ces solvants chimiques permettent une réversibilité de la réaction, appelée désorption, ce qui autorise leur recyclage dans un processus en circuit fermé.

Parmi les solvants chimiques qui réagissent avec H_2S envisageables figurent le lavage à la soude caustique, l'utilisation de solutions aqueuses d'alcanolamine, ainsi que le recours à des amines présentant un encombrement stérique.

✓ **L'absorption physique :**

Dans le procédé d'absorption physique, le solvant démontre une affinité particulière envers les constituants à absorber, conduisant à la formation de liaisons physiques de type Van der Waals suite au contact entre le solvant et le gaz à purifier. Cette méthode se révèle plus efficace à des températures basses et à des pressions partielles élevées.

Le premier solvant physique qui ne réagissent pas avec H_2S utilisé historiquement fut l'eau, cependant, les gaz acides présentent une solubilité trop faible dans ce solvant pour que son efficacité soit satisfaisante. Le méthanol et le carbonate de propylène figurent parmi les premiers solvants physiques commercialisés.

- ✓ Par rapport à la notion d'équilibre pour le transfert de matière pour le procédé d'absorption, on peut citer quelques remarques en dessous : [19]

Dans le cadre du processus d'absorption, une condition cruciale pour qu'un transfert de matière s'opère de la phase gazeuse vers la phase liquide réside dans l'existence d'un

potentiel, caractérisé comme un écart par rapport à l'équilibre, exprimé en termes de différence de concentration (en mol.m⁻³), qui engendre un flux de transfert de matière à l'interface.

La concentration du composé volatil dans le solvant est tributaire de l'avancement de la réaction, de la concentration du soluté dans la solution (telles que les amines dans l'eau, par exemple), ainsi que des paramètres de pression et de température.

Dans le contexte d'une **solution idéale**, à l'état d'équilibre, il est énoncé que la pression partielle d'un composé A, désignée par P_A, est égale au produit de sa pression de vapeur P_v, à la même température, par la fraction molaire en phase liquide X_A. Cette relation est connue sous le nom de **loi de Raoult** :

$$P_A = P_v \times X_A.$$

Dans le cadre d'une **solution non idéale**, lorsque la dilution est considérable ou que la pression est basse, **la loi de Henry** est généralement mise en œuvre. La pression à l'équilibre, notée P_A^{*}, du gaz dissous, est proportionnelle à sa fraction molaire en phase liquide, selon l'expression :

$$P_A^* = H \times X_A$$

Dans cette relation, H représente le coefficient de la loi de Henry, lequel est tributaire de la température. Dans le cas où le gaz dissous réagit avec le solvant, cette loi peut être appliquée à la fraction dissoute qui n'a pas réagi.

Il est postulé que l'équilibre entre le gaz et le liquide s'établit à l'interface liquide-vapeur, où la concentration C_A^{*} est en correspondance avec la pression partielle P_{Ai}^{*}. Les paramètres k_L et k_G représentent respectivement les coefficients de transfert dans le liquide (exprimé en m/s) et dans le gaz (en mol.m⁻².s⁻¹.Pa⁻¹), tandis que φ_A désigne le flux spécifique d'absorption par unité d'aire interfaciale :

$$\Phi_A = k_G (P_A - P_{Ai}^*) = k_L (C_{A^*} - C_A).$$

Dans ces expressions :

P_{Ai}^{*} : désigne la pression partielle de A à l'interface à l'état d'équilibre ;

C_A^{*} : représente la concentration en gaz dissous de A à cette même interface.

En régime permanent, Whitman postule que la résistance au transfert de masse se trouve principalement concentrée dans deux films minces, d'épaisseur δ_L dans la phase liquide et δ_G dans la phase gazeuse, localisés aux abords de l'interface où réside la majeure partie

de cette résistance. À l'intérieur de chaque film, le phénomène est gouverné par la diffusion moléculaire en régime permanent. En dehors de ces films, les concentrations et les pressions partielles demeurent uniformes. C'est la **théorie du double film de Whitman**. [19]

- ✓ L'absorption est un processus qui nécessite l'utilisation de deux colonnes : une colonne d'absorption (absorbeur) permettant de séparer le H₂S des autres constituants à l'aide d'un solvant chimique ou physique, et une colonne de régénération permettant de récupérer ce composant sous forme gazeuse et de régénérer le solvant.

Le choix du solvant constitue un élément crucial de ce processus, car il doit répondre à des critères spécifiques afin d'assurer un traitement optimal : il doit présenter une sélectivité envers le sulfure d'hydrogène (H₂S), une stabilité thermique et chimique, ainsi qu'une non-corrosivité. La disponibilité du solvant est également un aspect à considérer, mais surtout, sa capacité à solubiliser efficacement le H₂S demeure primordiale.

Industriellement, on applique généralement l'absorption en utilisant les amines pour traiter le gaz. La combinaison d'amine est enrichie de proportions d'eau variables en fonction de la nature de l'amine utilisée. Cette incorporation d'eau limite les pertes des hydrocarbures absorbés par le solvant, offrant ainsi un avantage significatif à ce processus.

La réaction de H₂S avec les amines est très exothermique, et plus la chaleur de cette réaction est élevée plus l'énergie de régénération du solvant sera plus élevée.

La figure III.3 en dessous présente un schéma simplifié sur le procédé de désulfuration du GPL par amine. Le solvant pauvre de H₂S et le gaz à purifier pénètrent respectivement dans le haut et le bas d'un contacteur équipé de plateaux ou de garnissage, opérant à basse température et haute pression. Ce contact, réalisé en contre-courant, favorise le transfert du H₂S vers le solvant en raison du gradient de pression partielle. Le solvant riche de H₂S est ensuite acheminé vers un échangeur afin d'être préchauffé par le solvant pauvre de H₂S.

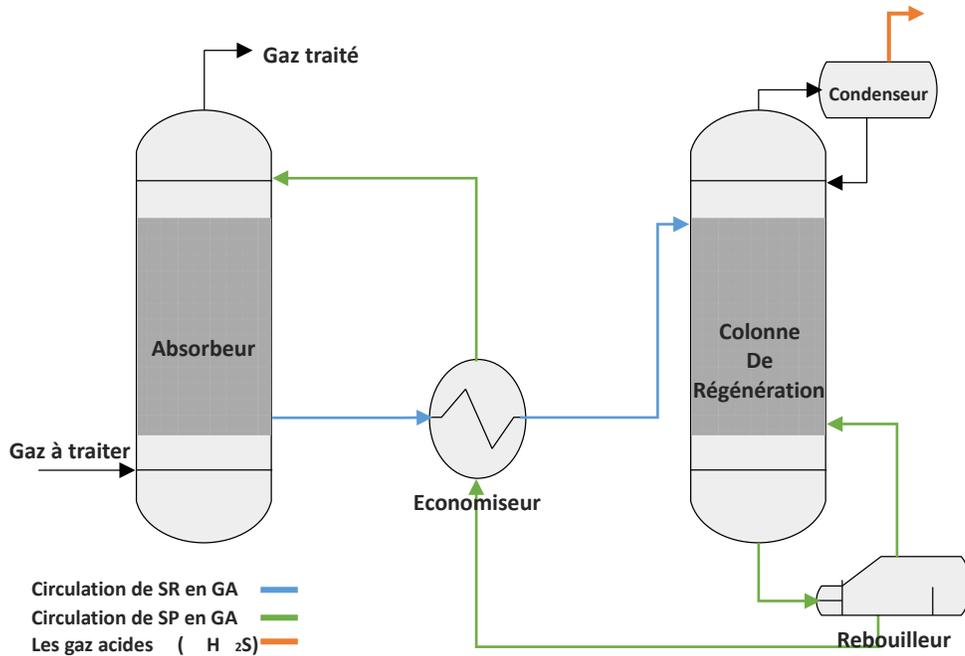


Figure III.1. Schéma simplifié du procédé de désulfuration du GPL par absorption par amine. [19]

La régénération du solvant saturé se réalise au sein de la colonne de régénération, où un courant ascendant de vapeur entraîne les impuretés contenues dans le solvant chargé, introduit à l'amont de la colonne. Par la suite, le solvant purifié est refroidi avant d'être réintroduit dans la partie supérieure de la colonne d'absorption.

✓ Pour ce procédé, on peut rencontrer quelques contraintes qui sont : [18]

1/ La corrosion : Les solvants chimiques présentent initialement une faible corrosivité du fait de leur pH relativement élevé (compris entre 8 et 11) et de leur faible conductivité électrique. Toutefois, leur corrosivité augmente lorsqu'ils absorbent du H₂S. Les principaux facteurs influençant cette corrosion sont les suivants :

- La nature de l'amine : lorsque chargées en H₂S, les amines présentent une corrosivité selon l'ordre : primaires > secondaires > tertiaires ;
- La concentration en amine ;
- Le taux de charge de l'amine en H₂S, qui accroît la corrosivité de la solution ;
- La température de service ;
- La concentration en produits de dégradation ;
- La vitesse de circulation du solvant, susceptible d'entraîner des phénomènes d'érosion en cas de débit excessif.

Afin de prévenir la corrosion, le processus de conception doit s'efforcer de limiter ces facteurs aggravants. Cependant, il n'est pas toujours possible de les éliminer entièrement par la conception et le contrôle des conditions opératoires. Par conséquent, il est souvent nécessaire d'opter pour des nuances d'acier résistant à la corrosion, notamment pour les zones les plus exposées du procédé (forte charge et hautes températures), voire d'utiliser des inhibiteurs de corrosion.

2/ La dégradation : Les produits de dégradation se réfèrent à des molécules de solvant dont la structure chimique a été altérée par des réactions non désirées avec d'autres composés ou sous l'influence de la chaleur. Bien que certains de ces produits puissent être réversiblement transformés en la molécule de solvant d'origine par des réactions inverses, d'autres réactions de dégradation sont irréversibles. Les produits de dégradation ainsi générés peuvent avoir des répercussions néfastes sur le procédé, telles qu'une diminution des performances pouvant entraîner une non-conformité du gaz produit, une augmentation des phénomènes de corrosion, ou encore une propension accrue du solvant à former de la mousse.

3/ Le moussage : La formation de mousse, problème fréquemment rencontré lors des opérations de désacidification des gaz par absorption, constitue probablement l'obstacle le plus courant. Elle peut réduire la capacité de traitement, altérer les performances, accroître les pertes de solvant et poser des défis pour les installations en aval.

Les nouveaux lots de solvant ont tendance à présenter une faible propension à mousser. Cependant, la présence de contaminants peut induire la formation de mousse. Les origines de ce phénomène sont variées, parmi lesquelles on compte la présence de particules en suspension, d'hydrocarbures liquides au fond de la colonne, de produits de dégradation de l'amine, de graisse ou de lubrifiants, ou encore une utilisation excessive d'agents anti mousses.

Le contrôle de la formation de mousse passe par l'élimination des contaminants responsables et par une filtration efficace du solvant. Cependant, il peut s'avérer difficile d'éliminer toutes les sources potentielles de mousse. En dernier recours, on peut déstabiliser la mousse en injectant de petites quantités d'agents anti mousses de manière stratégique, soit de manière soudaine, soit de façon continue.

4/ pertes de la solution d'amine : Les pertes d'amines peuvent survenir par entraînement de la solution, dégradation chimique de l'amine ou par des fuites mécaniques et évaporation.

- Pertes par entraînement : Ces pertes résultent de l'entraînement physique par le gaz présent dans l'absorbeur. Afin de limiter ces pertes, la configuration actuelle des absorbeurs inclut une section de lavage.

- Pertes par dégradation : Ces pertes peuvent être engendrées par le contact avec l'air, tout comme elles peuvent découler de températures élevées dans le rebouilleur.
- Pertes par évaporation : La vaporisation de l'amine résulte de l'augmentation de la tension de vapeur de l'amine, de la température et de la concentration de l'amine. Ces pertes peuvent être récupérées par un simple processus de lavage à l'eau.

III.3.2. Désulfuration par adsorption

L'adsorption peut être définie comme le processus sélectif de retenue d'un ou de plusieurs constituants d'un mélange gazeux ou liquide à la surface d'un solide. Le solide qui retient un composant est désigné comme l'**adsorbant**, tandis que le composant retenu est appelé l'**adsorbat**. Il s'agit d'une opération de transfert de masse significative qui constitue une méthode de séparation efficace pour les mélanges fluides, particulièrement efficace pour des concentrations en solutés faibles. Le phénomène d'adsorption découle de l'interaction entre les molécules de l'adsorbat et la surface ou les parois des pores de l'adsorbant. [18]

Il existe deux types d'absorption, qui sont :

- ✓ **L'adsorption physique** : également appelée physisorption, les forces d'interaction impliquées, telles que les forces de Van der Waals et les forces électrostatiques, sont relativement faibles. La chaleur d'adsorption associée est similaire à la chaleur de condensation du composant concerné.
- ✓ **L'adsorption chimique** : Le phénomène également connu sous le nom de chimisorption se caractérise par une interaction particulièrement intense entre le soluté et l'adsorbant, résultant de la formation d'une liaison chimique entre les deux entités. La chaleur de chimisorption est significativement supérieure à celle de l'adsorption physique, ce qui témoigne de l'ampleur de l'interaction et suggère l'implication d'une réaction chimique.

Le processus opposé à l'adsorption est dénommé désorption. Dans diverses applications, les substances adsorbées revêtent une importance matérielle, justifiant ainsi leur récupération lors d'une phase ultérieure de régénération de l'adsorbant. En revanche, dans d'autres circonstances, l'espèce adsorbée ne possède aucune valeur intrinsèque, rendant ainsi sa récupération ou la régénération de l'adsorbant non pertinente. [18]

Parmi les adsorbants utilisés pour la désulfuration par adsorption : le charbon actif, les tamis moléculaires, l'alumine, le gel de silice...etc.

L'élimination du H₂S par le procédé d'adsorption est faite généralement dans une colonne verticale à lit fixe. Lorsque le lit d'adsorbant approche de la saturation ça veut dire adsorption du H₂S, le flux d'alimentation est interrompu et le lit subit une opération de désorption ou de régénération. Un gaz de régénération approprié est alors dirigé à travers le lit, et après un laps de temps défini, la majorité des molécules de H₂S adsorbées sont éliminées. L'adsorbant ainsi régénéré est alors prêt à être réutilisé. L'emploi de deux colonnes d'adsorption permet de réaliser ces deux opérations complémentaires, à savoir l'adsorption et la régénération, simultanément et sans interruption de la production.

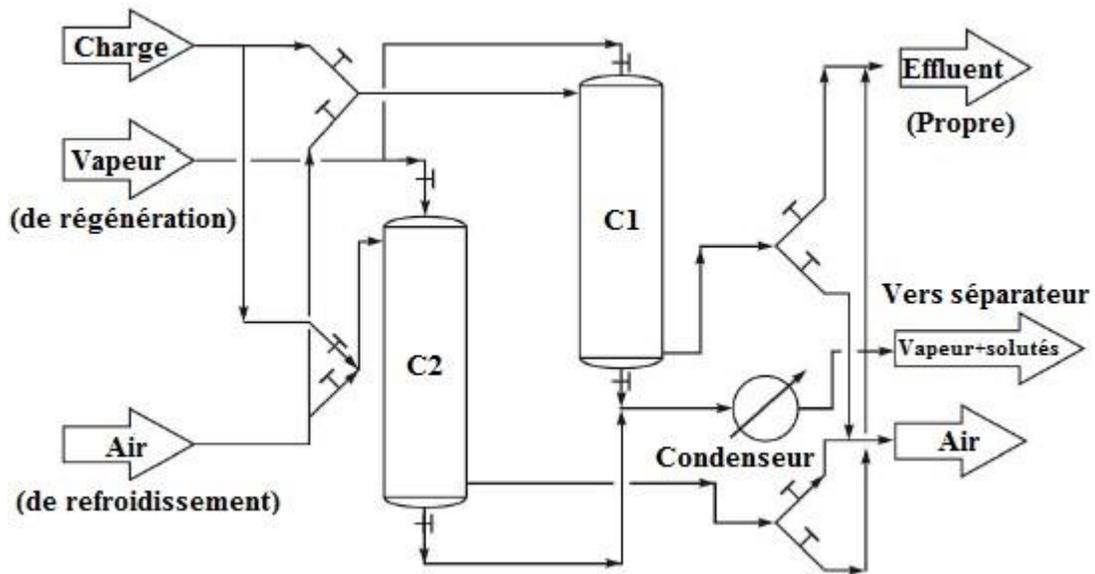


Figure III.2. Schéma simplifié du procédé de désulfuration du GPL par adsorption. [18]

III.3.3. Désulfuration du GPL par extraction liquide-liquide

L'extraction liquide-liquide, une procédure de séparation sophistiquée, implique la mise en contact d'une solution liquide homogène, appelée charge (GPL), composée d'un soluté (H₂S) et d'un diluant, avec un second liquide partiellement miscible, désigné comme solvant. Ce processus vise à faciliter le transfert de H₂S de la charge vers le solvant. Les deux phases liquides résultantes sont ensuite séparées en fonction de leur différence de densité. La phase enrichie en soluté, connue sous le nom d'extrait, est obtenue, tandis que le reste de la charge, susceptible de contenir une faible quantité de soluté, est désigné comme raffinat. [18]

Dans le cas où le diluant et le solvant sont partiellement miscibles, une petite quantité de solvant peut également être dissoute dans la phase raffinat, tandis que la phase extrait peut contenir une certaine quantité de diluant. Par la suite, le soluté est extrait de la phase extrait avec une pureté acceptable, tandis que le solvant dissout dans la phase raffinat est récupéré. Le processus d'extraction liquide-liquide de H₂S se déroule généralement en quatre étapes principales :

- a. La mise en contact intime du GPL et du solvant par dispersion d'une phase dans l'autre à l'aide d'un équipement approprié.
- b. La séparation des phases extrait et raffinat selon leur différence de densité.
- c. L'élimination et la récupération de H₂S dissous dans la phase extrait sous une forme relativement pure, ce qui permet simultanément la récupération du solvant contenu dans la phase extrait.
- d. L'élimination et la récupération du solvant contenu dans la phase raffinat, généralement par distillation ou par stripping.

Ces étapes peuvent être réalisées soit de manière discontinue (batch), soit de manière continue, en fonction des exigences du processus. [18]

Plus de détails sur la désulfuration du GPL par extraction liquide-liquide seront mentionnés dans le chapitre suivant.

III.3.4. Désulfuration du GPL par perméation membranaire

Au cœur de ce procédé réside une membrane, généralement constituée de matériau polymère, dont la perméabilité varie selon les espèces chimiques. Le principe fondamental de ce procédé membranaire consiste à faire passer le flux gazeux (GPL) sous haute pression d'un côté de la membrane. Étant donné que la pression de l'autre côté de la membrane est considérablement plus faible, des différences de pression partielle se créent entre le côté amont de la membrane, appelé rétentat, et le côté aval, appelé perméat. Ces disparités de pression partielle servent de force motrice pour le transfert de matière à travers la membrane.

La force motrice à l'origine de la perméation, et donc de la séparation, réside dans la différence de pressions partielles entre les deux côtés de la membrane. Ainsi, bénéficiant d'un approvisionnement en GPL sous haute pression présente un avantage notable dans ce contexte.

Pour assurer le bon fonctionnement du procédé, il est impératif de maintenir une température légèrement élevée afin de prévenir tout risque de condensation. De plus,

avant d'être dirigé vers les membranes, le gaz doit subir des traitements préliminaires visant à éliminer les liquides ainsi que les hydrocarbures lourds susceptibles de se condenser sur les membranes et de les altérer. [18]

III.4. Les solvants alcanolamines

Parmi les divers solvants chimiques disponibles, les solutions d'alcanolamines se distinguent comme les plus fréquemment utilisées dans les procédés de désulfuration du GPL. Ces liquides réagissent avec les gaz acides lorsqu'ils entrent en contact, formant ainsi des complexes aux liaisons variables.

La composition moléculaire des alcanolamines comprend au moins un groupe hydroxyle (-OH) et un groupe amine (-N), conférant respectivement une meilleure solubilité dans l'eau et la basicité essentielle à l'absorption des gaz acides tels que le H₂S et le CO₂.

Le classement des différentes amines selon le degré de substitution de leur atome d'azote permet de distinguer leurs propriétés respectives. Les amines, du fait de leur nature intrinsèquement basique, réagissent avec les gaz acides pour former des sels. Ce processus, connu sous différentes appellations telles que lavage à l'amine, traitement des gaz acides, traitement des gaz à l'amine, désoxygénation des gaz ou élimination des gaz acides, est une étape cruciale dans le traitement des gaz industriels.

Ainsi, les alcanolamines, grâce à leurs caractéristiques spécifiques et à leur efficacité dans l'absorption des gaz acides, demeurent un choix privilégié dans de nombreuses applications industrielles nécessitant le nettoyage des flux gazeux contaminés. [21]

Les principaux types des amines utilisés étant les suivants : [22]

- Monoéthanolamine (MEA)
- Diéthanolamine (DEA)
- Méthyl diéthanolamine (MDEA)
- Diisopropanolamine (DIPA)
- Aminoéthoxyéthanol (Diglycolamine) (DGA)

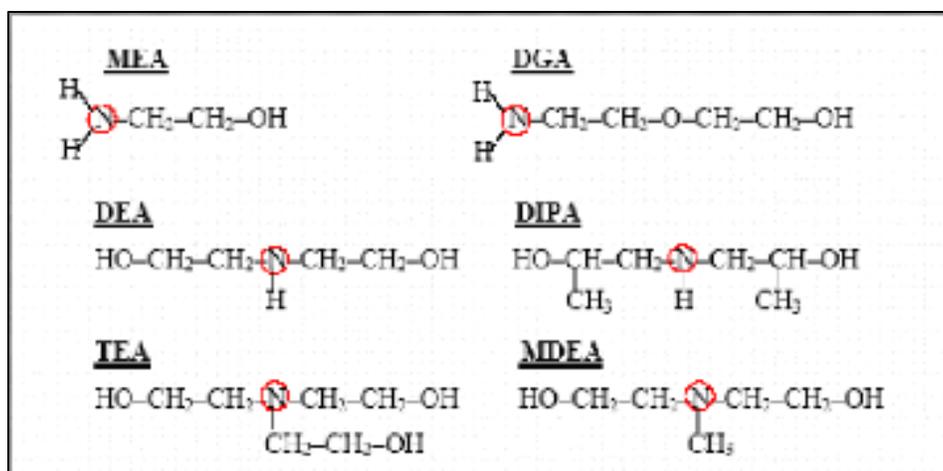


Figure III.3. Les types des amines.

III.5. Les différentes classes des amines

Les amines peuvent être classées en trois grandes familles : les amines primaires, secondaires et les tertiaires. [18]

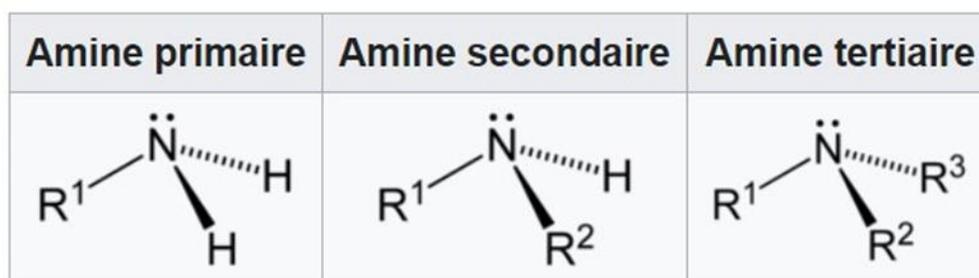


Figure III.4. Les différentes classes des amines. [18]

III.5.1. Les amines primaires (R_1NH_2)

Les amines primaires (R_1NH_2) sont des composés chimiques très réactifs en raison de la présence du groupe fonctionnel amine ($-NH_2$), qui contient un atome d'azote lié à deux atomes d'hydrogène. Cette réactivité est particulièrement notable lorsqu'elles entrent en contact avec des gaz acides.

En raison de leur grande réactivité avec les gaz acides, les amines primaires sont souvent utilisées dans des procédés de purification et de séparation des gaz pour produire des produits de haute pureté. Leur capacité à former des sels d'ammonium avec les acides et des adduits avec les gaz acides les rend utiles dans une variété d'applications industrielles, telles que la purification des gaz dans l'industrie chimique et pétrochimique,

la capture du CO₂ dans les processus de séquestration du carbone, ou encore dans la synthèse de composés organiques de haute pureté. [21]

L'amine primaire le plus utilisé est la **Monoéthanolamine « MEA »**.

✓ **Propriétés physiques du MEA**

La monoéthanolamine est un liquide incolore, de faible odeur ammoniacale. Elle est soluble dans l'eau et dans nombreux solvants organiques. [21]

- Masse molaire : 61,08 g/mol.
- Point de fusion : 10,5°C.
- Point d'ébullition : 170,5°C sous 1 bar.
- Densité : 1.015 – 1,020 g/cm³.
- Tension de vapeur : 0,5 mbar à 20°C et 7.86 mbar à 40°C.
- Point d'éclair : 93°C en coupelle ouverte.

✓ **Propriétés chimiques du MEA : [21]**

Formule chimique : NH₂- CH₂ - CH₂ – OH.

La MEA comprend un groupe hydroxyle (OH-) qui sert à réduire la tension de vapeur et augmenter la solubilité dans l'eau et un groupe aminé qui donne au composé les caractéristiques d'élimination du H₂S.

La MEA s'oxyde lentement sous l'action de l'air en se colorant en jaune ou en brun. Elle présente les réactions caractéristiques des amines et des alcools et peut réagir vivement avec les produits oxydants. Avec les acides, il se produit un échauffement.

Certains métaux sont attaqués par la MEA, notamment les suivants : cuivre et ses alliages, fer, aluminium, alliages légers.

III.5.2. Les amines secondaires (R₁R₂NH)

Les amines secondaires, de formule générale R₁R₂NH, sont caractérisées par la présence de deux groupes alkyles liés à un atome d'azote.

Comparées aux amines primaires, elles sont généralement moins réactives en raison de leur structure moléculaire. Cette moindre réactivité les rend souvent adaptées à des applications moins exigeantes en termes de pureté et moins susceptibles de subir des réactions indésirables avec d'autres composés. [21]

L'amine secondaire le plus utilisé est **la Diéthanolamine (DEA)**.

✓ Propriétés physiques du DEA :

La diéthanolamine est un liquide incolore d'odeur ammoniacale. Elle est soluble dans l'eau et dans nombreux solvants organiques.

- Masse molaire : 105,135 g/mol.
- Point de fusion : 28°C.
- Point d'ébullition : 269°C.
- Masse volumique 1,10 g·cm⁻³ à 20 °C.
- Point d'éclair : 138°C en coupelle ouverte.

✓ Propriétés chimiques du DEA

Formule chimique: HO –CH₂ - CH₂ –NH- CH₂ - CH₂ – OH.

La DEA est similaire à la MEA mais doit être préférée en cas de présence de COS (le sulfure de carbone) dans le gaz de la charge.

III.5.3. Les amines tertiaires (R₁R₂R₃N)

Les amines tertiaires sont des composés organiques comportant un atome d'azote lié à trois groupes alkyles différents, ce qui leur confère la formule générale R₁R₂R₃N. Comparées aux amines primaires et secondaires, les amines tertiaires sont généralement encore moins réactives en raison de leur structure moléculaire. Cependant, malgré leur faible réactivité, elles présentent une capacité d'absorption plus grande, ce qui les rend précieuses dans divers domaines industriels, notamment dans le domaine de la chimie environnementale et de la purification des gaz. [21]

L'amine secondaire le plus utilisé est la **Méthyl diéthanolamine « MDEA »**.

✓ Propriétés physiques du MDEA

- Masse moléculaire : 119.18
- Densité : 0.904
- Intervalle d'ébullition (à 1 ATM) : 100°-243° C
- Solubilité dans l'eau : complète
- Viscosité cinématique à 23°C : 7(mm²/s)
- Point d'éclair (°C) : 137°C.

✓ **Propriétés chimiques du MDEA**

La MDEA comprend un groupe hydroxyle (OH-) qui sert à réduire en plus la tension de vapeur et augmenter la solubilité dans l'eau et un groupe aminé qui donne au composé les caractéristiques d'élimination du H₂S.

La MDEA présente les réactions caractéristiques des amines et des alcools et peut réagir vivement avec les produits oxydants. Avec les acides, il produit une réaction exothermique. La MDEA est un solvant qui n'est pas très corrosif.

III.6. Comparaison entre les types des amines

Tableau III.1. Comparaison entre la MEA, DEA et la MDEA.

Amine	Avantages	Inconvénients
MEA	<ul style="list-style-type: none"> - Coût faible - Produits de dégradation peuvent être enlevés par l'utilisation d'un récupérateur. - Forte réactivité - Faible absorption des hydrocarbures 	<ul style="list-style-type: none"> - Non sélective - Dégradation irréversible en présence de COS, CS₂ - Produits de dégradation sont corrosifs. - Besoins énergétiques élevés durant la régénération.
DEA	<ul style="list-style-type: none"> - Moins corrosive que la MEA - Pression de vapeur plus faible que celle de la MEA - Résistance à la dégradation par COS et CS₂ - Besoins énergétiques moins élevés que MEA 	<ul style="list-style-type: none"> - Réactivité plus faible que MEA - Débit de circulation plus élevé que MEA - Coût du solvant plus important que MEA

MDEA	<ul style="list-style-type: none">- Sélectivité élevée.- Faible corrosivité et volatilité.- Besoins énergétiques faibles.- Faible dégradation	<ul style="list-style-type: none">- Coût le plus élevé.- Réactivité la plus faible.
-------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Chapitre IV Description de l'unité de traitement du GPL
600 700 de la RA1D

**Chapitre.IV. Description de l'unité de
traitement du GPL 600/700 de la RA1D**

Chapitre IV Description de l'unité de traitement du GPL **600 700 de la RA1D**

IV.1. Introduction

Au sein des installations raffinées de la prestigieuse raffinerie d'Adrar, une unité d'une importance capitale se démarque : l'unité de désulfuration du Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL). Cette entité, symbole d'ingénierie sophistiquée et de rigueur technologique, revêt une place éminente dans le processus de production, s'inscrivant comme une pièce maîtresse dans l'obtention d'un GPL de haute qualité, répondant scrupuleusement aux exigences des normes internationales les plus exigeantes.

La désulfuration du GPL, telle que pratiquée au sein de cette raffinerie, revêt un caractère impérieux dans la quête incessante de perfectionnement et d'excellence. Elle incarne le mariage subtil entre l'expertise ingénieuse et les normes de qualité les plus élevées, visant à purger les composés sulfurés indésirables de cette ressource précieuse. Au-delà de l'aspect technique, cette entreprise s'inscrit dans une démarche de garantie de sécurité et de fiabilité pour les multiples applications industrielles et domestiques du GPL.

Dans le présent chapitre, nous nous plongerons avec minutie dans les arcanes de cette unité de désulfuration, dévoilant ses subtilités opérationnelles, les technologies avancées qu'elle déploie, ainsi que l'impact majeur qu'elle exerce sur la qualité finale du GPL, inscrivant ainsi la raffinerie d'Adrar dans les annales de l'excellence industrielle.

IV.2. L'objectif de l'unité

Cette unité est très indispensable afin d'obtenir un GPL qui répond aux normes de qualité commerciales exigées par l'état.

L'objectif de cette unité est de réduire la teneur en soufre du GPL en deux étapes principales. Tout d'abord, l'hydrogène sulfuré (H_2S) est éliminé du gaz à l'aide d'une solution de MEA comme solvant concentrée en 30% par un procédé d'extraction liquide-liquide avec une régénération du solvant après l'utilisation.

La deuxième étape implique l'élimination des mercaptans (RSH) à l'aide de soude caustique (NaOH) concentrée en 10% par un procédé d'oxydation (MEROX). [6] Ce dernier, c'est un procédé catalytique efficace et économique développé pour le traitement chimique des distillats de pétrole afin d'éliminer le soufre présent sous forme de mercaptans (extraction MEROX) ou de convertir le soufre mercaptan en une forme moins objectionable. [23]

Chapitre IV Description de l'unité de traitement du GPL 600 700 de la RA1D

IV.3. Description de l'unité 600 de traitement du GPL par amine

Comme il est déjà mentionné, l'unité 600 sert à réduire la teneur en H₂S du GPL obtenu à partir de l'unité de craquage catalytique RFCC et de l'unité de distillation atmosphérique CDU.

Cette unité est devisée en deux parties essentielles :

IV.3.1. Désulfuration du GPL par extraction liquide-liquide par l'amine

Le gaz de pétrole liquéfié (GPL), issu de la conjonction entre l'unité RFCC et l'unité atmosphérique CDU, est mélangé en ligne, puis acheminé vers le ballon accumulateur (D203 601).

Par la suite, il est aspiré par la pompe (P203-601) et refoulé vers la partie inférieure de la colonne d'extraction (C203-601).

Dans ladite colonne, le solvant d'extraction employé est la monoéthanolamine (MEA) à une concentration de 30% injectée dans la partie supérieure de la colonne à une température de 25°C, cette solution vise l'élimination du sulfure d'hydrogène (H₂S). [6]

La réaction entre le sulfure d'hydrogène et l'amine utilisée est la suivante :



Au sein de la colonne d'extraction (C203-601), l'amine chargée, composée de l'amine additionnée de sulfure d'hydrogène (H₂S), est collectée au niveau inférieur de ladite colonne et dirigée vers la section dédiée à la régénération des amines.

Parallèlement, le produit principal, à savoir le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL), provenant de la partie supérieure de la colonne d'extraction (C203-601), transite à travers le ballon (D203- 602) afin d'éliminer les résidus d'amines entraînés avec le GPL en tête de ce ballon. [6]

IV.3.2. La régénération d'amine d'extraction

Les amines chargées en soufre provenant du fond de la colonne d'extraction du GPL (C203-601) et colonne d'absorption du dry gaz (C203-602) (il existe une unité de traitement de dry gaz en utilisant l'amine, c'est pour cela les amines des deux unités sont accumulées afin d'être régénérées ensemble et de récupérer une amine sans H₂S) pénètre

Chapitre IV Description de l'unité de traitement du GPL **600 700 de la RA1D**

dans le filtre (SR203-601), puis traverse l'échangeur (203-602) pour un échange thermique avec les amines pauvres (fraîches) à une température de sortie de 98°C.

À la sortie des échangeurs, l'amine chargée en soufre entre dans le ballon de flash (D203-605), où de l'amine fraîche ainsi que de l'azote sont injectés en tête du ballon. La majeure partie des hydrocarbures dissous est éliminée dans ce ballon avant d'être acheminée vers le ballon (D203-613).

Le fond du ballon (D203-605), composé d'amine chargée en soufre, est acheminé vers le 3ème plateau de la colonne de régénération (C203-603). Le fond de la colonne de régénération (C203-603) est chauffé par le rebouilleur (E203-605). Les gaz provenant du sommet de la colonne passent à travers le condenseur (E203-604) pour être refroidis à 25°C avant d'entrer dans le ballon de séparation (D203-606). Les condensats du fond du ballon (D203-606) sont pompés par la pompe (P203-603 /1.2) et renvoyés vers la colonne (C203-603) comme reflux au niveau du 1er plateau. Le fond intermédiaire de la colonne de régénération, constitué d'amine fraîche, passe par l'échangeur (E203-602) pour un échange thermique avec l'amine chargée en soufre, puis entre dans le condenseur (E203-603) avant de sortir à une température de 25°C, pour finalement être acheminé vers le ballon (D203-607) comme amine fraîche. [6]

✓ On résume ces deux étapes sur le schéma ci-dessous :

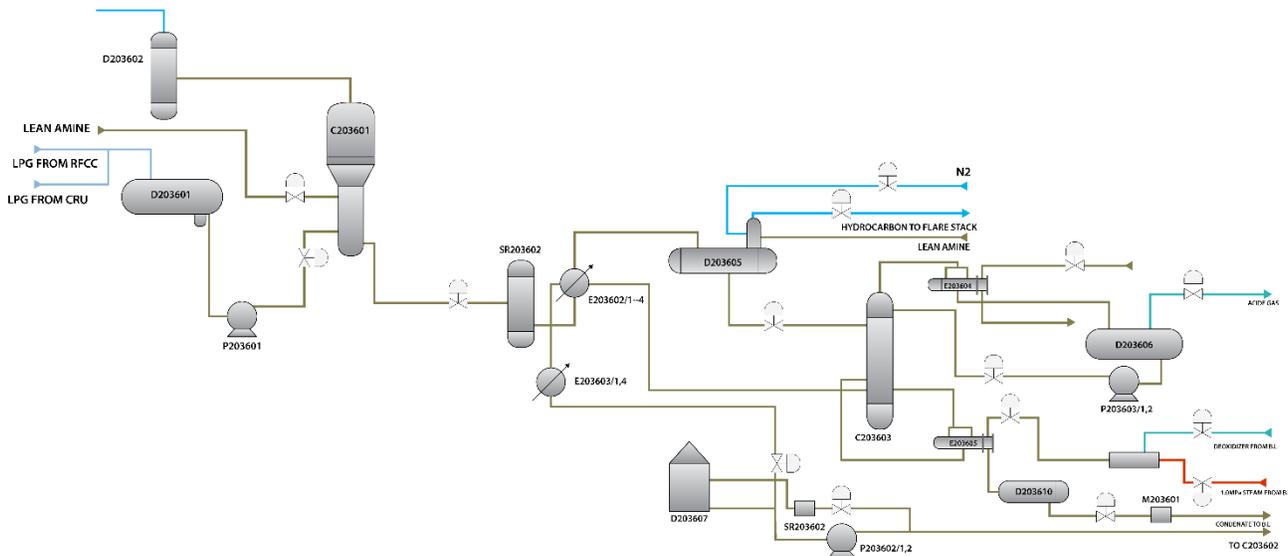


Figure IV-1 Schéma simplifié du procédé de désulfuration du GPL. [24]

Chapitre IV Description de l'unité de traitement du GPL **600 700 de la RA1D**

IV.4. Description de l'unité 700 de traitement du GPL par la soude

Comme il est déjà mentionné, cette unité traite le GPL désulfuré par amine afin d'éliminer ou de réduire le teneur des mercaptans dans le GPL sous le nom du procédé MEROX.

IV.4.1. Généralités sur le procédé MEROX

Le processus MEROX est un processus catalytique efficace et économique développé pour le traitement chimique des fractions pétrolières afin d'éliminer le soufre présent sous forme de mercaptans ou de convertir directement le soufre mercaptan en disulfures moins objectionnable. [23]

Ce processus est utilisé pour le traitement en phase liquide des gaz de pétrole liquéfiés (GPL), des liquides de gaz naturel (GNL), des naphthas, des essences, des kérosènes, des carburants pour réacteurs, et des combustibles pour le chauffage. Il peut également être utilisé pour adoucir le gaz naturel, le gaz de raffinerie, et le gaz synthétique en conjonction avec des processus de prétraitement conventionnels.

Son principe est basé sur l'extraction des mercaptans et leur conversion à des températures et pressions normales. Selon l'application, l'extraction et l'adoucissement peuvent être utilisés soit individuellement, soit en combinaison. Le processus repose sur la capacité d'un catalyseur organométallique à favoriser l'oxydation des mercaptans en disulfures dans un environnement alcalin en utilisant l'air comme source d'oxygène. Pour les hydrocarbures légers, la pression de fonctionnement est contrôlée légèrement au-dessus du point de bulle pour garantir un fonctionnement en phase liquide ; pour les stocks plus lourds, la pression de fonctionnement est normalement réglée pour maintenir de l'air dissous dans la section de réaction. Les gaz sont généralement traités à leurs pressions systémiques prévalentes. [23]

- ✓ Les mercaptans de faible poids moléculaire sont solubles dans la solution de soude caustique. Par conséquent, lors du traitement des gaz, des GPL ou des fractions de gaz légers, le procédé MEROX peut être utilisé pour extraire les mercaptans, réduisant ainsi la teneur en soufre du produit traité. La réduction du soufre réalisable est directement liée à la teneur en mercaptans extractibles de l'alimentation fraîche.

Dans les unités d'extraction de mercaptans, l'alimentation fraîche est introduite dans une colonne d'extraction, où les mercaptans sont extraits par un flux de soude en contre-courant. Le produit traité passe en tête pour être stocké ou traité en aval.

Chapitre IV Description de l'unité de traitement du GPL 600 700 de la RA1D

La solution caustique riche en mercaptans contenant un catalyseur MEROX s'écoule du bas de la colonne d'extraction vers la section de régénération à travers un échangeur de chaleur à vapeur, utilisé pour maintenir une température appropriée dans l'oxydant. De l'air est injecté dans ce flux, et le mélange s'écoule vers le haut à travers l'oxydant, où la soude est régénérée en convertissant les mercaptans en disulfures. L'effluent de l'oxydant s'écoule dans le séparateur de disulfure, où l'air usé, l'huile de disulfure et la solution de soude régénérée sont séparés. L'air usé est évacué vers un endroit sûr, et l'huile de disulfure est décantée et envoyée à une élimination appropriée. Le flux de soude régénérée est retourné à la colonne d'extraction. Une petite quantité de catalyseur MEROX est ajoutée périodiquement pour maintenir l'activité requise. [23]

Voici une figure qui représente le principe du procédé MEROX ci-dessous :

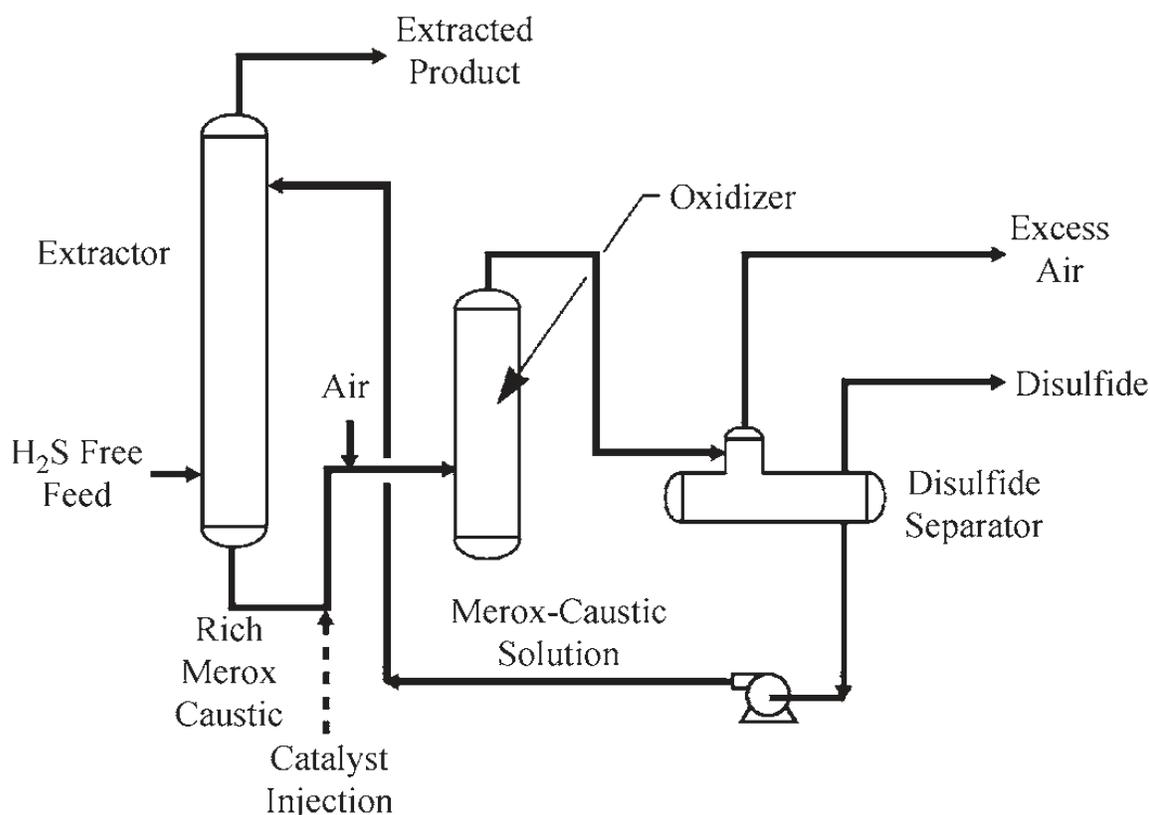


Figure IV-2 Schéma simplifié sur le principe d'une unité d'extraction des mercaptans par le procédé MEROX. [23]

IV.4.2. Description de l'unité 700

✓ **Élimination des mercaptans :**

Chapitre IV Description de l'unité de traitement du GPL

600 700 de la RA1D

Les gaz GPL émanant en amont du ballon (D203-602) se mêlent à une solution alcaline (NaOH) à 10% de concentration dans le mélangeur (MI203-701), puis transitent par le ballon de lavage pré-alcalin (D203-701) en vue d'une séparation efficace.

La phase liquide du ballon (D203-701), constituée d'une solution déjà exploitée, est recyclée de manière progressive dans le mélangeur (MI203-701) jusqu'à ce qu'elle atteigne sa saturation.

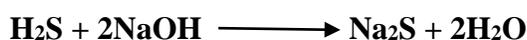
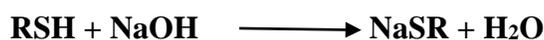
La soude fraîche est acheminée par intervalles à l'aide de la pompe (P203-701/1.2). La solution usagée (contaminée) de soude provenant du ballon (D203-701) est évacuée vers le réservoir (tank) (D203-505).

Le GPL provenant du sommet du ballon (D203-701) pénètre dans la colonne (C203-701), une colonne d'extraction et d'adoucissement où le liquide d'extraction est une solution alcaline - catalyseur dissous dans le cobalt sulfophthalocyanine.

Le GPL adouci du sommet de la colonne (C203-701) est dirigé vers le mélangeur (MI203-702) pour être lavé avec de l'eau dessalée, puis passe dans le ballon de séparation (D203-702).

Le GPL désulfuré quitte la colonne en haut et subit à un lavage d'eau au niveau du mélangeur (M203-702) afin d'être lavé par l'eau dessalée, puis il est envoyé vers le ballon (D203-702) où se fait la séparation de l'eau de lavage. [6]

Les réactions mise en jeu sont les suivantes :



Le GPL issu du sommet du ballon (D203 702), une fois lavé, est introduit dans la colonne à filtre à sable (C203 702) pour une séparation supplémentaire visant à éliminer les impuretés et les traces de mousse alcaline et d'humidité, avant de passer dans la colonne de désulfuration par adsorption (C203 704/1.2) pour éliminer les résidus d'hydrogène sulfuré, de mercaptans et d'autres composés soufrés.

Enfin, le GPL sortant de la colonne (C203 704/1.2) est conforme et est dirigé vers le stockage ou vers l'unité de fractionnement des gaz comme produit fini. [6]

✓ **Régénération : catalyseur – alcalin de fond de la colonne (C203-701) :**

La solution alcaline, catalyseur du GPL, qui adoucit depuis le fond de la colonne (C203-701), est chauffée à 60°C en utilisant soit l'eau purifiée provenant du stripper des eaux acides, soit de l'eau chaude à l'aide d'un échangeur (E203-701). À la sortie de cet échangeur, de l'air non purifié (l'air de service) est injecté depuis le compresseur d'air

Chapitre IV Description de l'unité de traitement du GPL 600 700 de la RA1D

pour favoriser l'oxydation, avant que la solution (alcaline, catalyseur) ne pénètre dans la colonne d'oxydation (C203-703) en vue de sa régénération.

Le catalyseur de la solution alcaline régénérée est dirigé vers le ballon séparateur (D203-703) pour éliminer le disulfure. La phase liquide du ballon (D203-703) traverse ensuite le condenseur (E203-702/1.2) avant d'être aspirée par la pompe (P203-701/1.2) et refoulée dans la colonne d'extraction (C203-701). [6]

La régénération est faite selon les réactions mentionnées en dessous :



✓ On résume ces deux étapes sur le schéma ci-dessous :

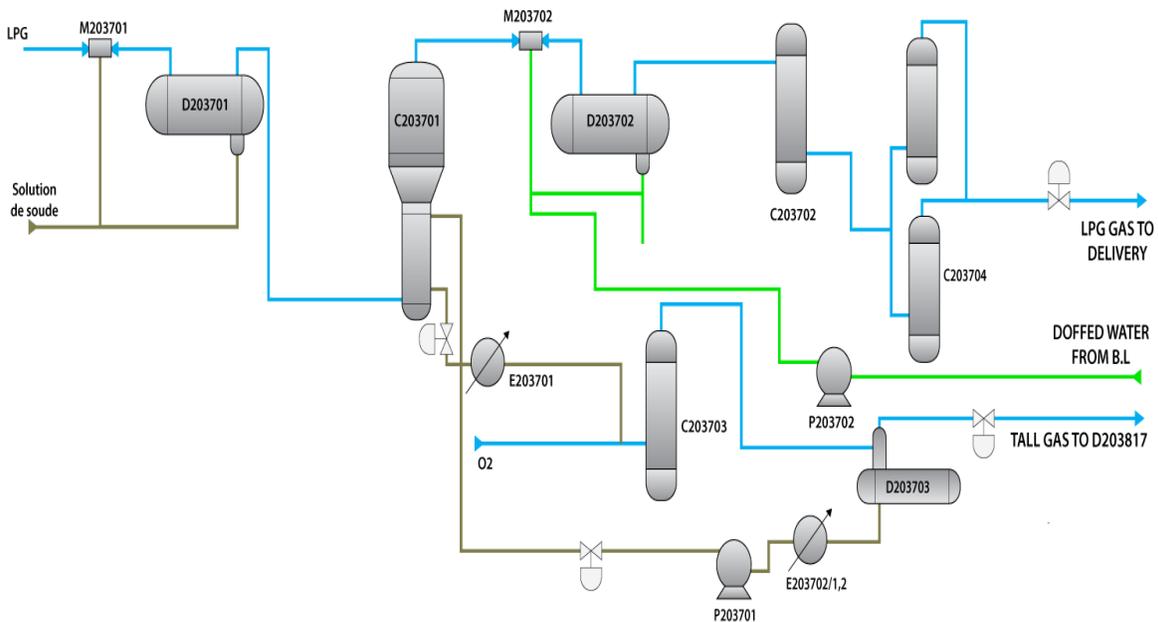


Figure IV-3 Schéma simplifié du procédé de désulfuration du GPL par oxydation. [24]

Chapitre.V. Généralités sur la simulation

V.1.Introduction

Le progrès de l'informatique appliquée à la simulation nous octroie la capacité de surmonter l'obstacle que représente la longueur des calculs manuels, en nous appuyant sur l'usage de logiciels de simulation.

Les outils de simulation tels qu'Aspen Plus, ChemCAD, Hysim, Hysys, et Pro-II, qui jouissent d'une popularité croissante, s'avèrent de plus en plus incontournables dans la conception de nouvelles unités et l'optimisation des procédés industriels, souvent en quête de leur efficacité maximale.

Cela dit que le simulateur HYSYS est l'un des plus performants logiciels de simulation. [25]

V.2.Généralités sur la simulation

V.2.1. Définition

La simulation se définit comme la représentation d'un phénomène physique à l'aide de modèles mathématiques élémentaires, visant à décrire sa dynamique. En d'autres termes, elle offre la possibilité de dépendre au moyen de modèles mathématiques les divers phénomènes de transfert de masse, d'énergie et de quantité de mouvement qui interviennent au sein des différentes opérations unitaires. [25]

V.2.2. Le but d'une simulation

L'objectif de la simulation de procédé réside dans l'élaboration d'un modèle mathématique capable d'appréhender le comportement du procédé sous investigation. Ce modèle doit être apte à anticiper le fonctionnement du processus dans diverses conditions, incluant les variations de composition de l'alimentation, le rendement et d'autres variables cruciales. La simulation de procédé permet aux ingénieurs d'explorer diverses conceptions, d'optimiser les paramètres opérationnels et d'évaluer la faisabilité économique du procédé. De surcroît, elle permet de déceler les risques potentiels en matière de sécurité, d'impact environnemental et de conformité réglementaire. En outre, la simulation de procédé peut être exploitée à des fins de formation des opérateurs et de développement de stratégies de contrôle. [26]

V.3.Le simulateur HYSYS

V.3.1. Définition

Aspen HYSYS représente un logiciel de simulation tant statique que dynamique, dédié à l'analyse des procédés industriels, incluant notamment la distillation, les échanges thermiques, la réaction chimique et l'absorption. Son adoption est significative au sein de

l'industrie, où il est largement employé pour le dimensionnement, la modélisation et l'analyse économique des procédés.

Le simulateur trouve son utilité tant dans la phase de conception d'un procédé industriel que dans le suivi des opérations déjà établies. Dans le premier cas, il permet d'établir les bilans de matière et d'énergie du procédé, ainsi que de dimensionner les équipements requis. Quant au suivi des procédés en place, il permet de réajuster les paramètres opérationnels en réponse à des variations dans la composition de l'alimentation ou dans les conditions de fonctionnement des équipements spécifiques. De plus, il sert à évaluer les performances des équipements en service. [27]

Voici la structure générale du simulateur HYSYS ci-dessous :

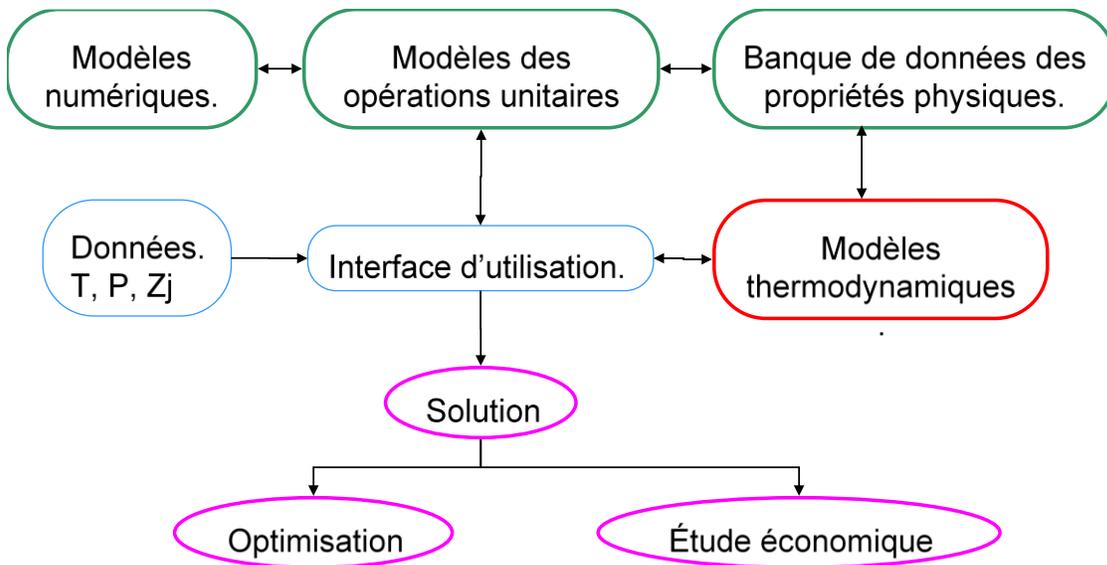


Figure V-1 Schéma simplifié sur la structure du simulateur hysys. [25]

V.3.2. Concepts et caractéristiques du simulateur Aspen HYSYS

Le simulateur Aspen HYSYS repose sur des concepts fondamentaux et des caractéristiques essentielles pour la construction de modèles.

V.3.2.1. Fluide package

Ce paquet contient toutes les données nécessaires pour les calculs de flash des composants et les propriétés physiques. En regroupant ces informations en une seule entité, il offre plusieurs avantages : [28]

- Centralisation : Toutes les données pertinentes sont regroupées en un seul endroit, facilitant ainsi la création et la modification.
- Portabilité : Les paquets de fluides peuvent être exportés et importés comme des entités complètement définies, prêtes à être utilisées dans d'autres simulations.
- Clonage : Il est possible de cloner les paquets de fluides, ce qui accélère la création ou la modification de paquets complexes.
- Flexibilité : Plusieurs paquets de fluides peuvent être utilisés simultanément dans une même simulation, offrant ainsi une flexibilité accrue dans la modélisation.

V.3.2.2. L'Environnement dans Aspen HYSYS (Aspen HYSYS Environnements)

Aspen HYSYS est structuré autour du concept d'environnements de conception. Ces environnements permettent d'accéder et de saisir des informations dans une zone spécifique de la simulation, tandis que les autres zones de la simulation sont mises en attente. Les calculs d'état stable dans les zones inactives ne seront pas exécutés tant que le travail dans la zone active n'est pas terminé. Étant donné que l'intégrateur d'Aspen HYSYS est basé sur des pas de temps, les environnements n'ont aucun impact sur les calculs dynamiques. [28]

V.3.2.3. Le sous-environnement de subflowsheet

Le concept de sous-environnement de subflowsheet constitue l'un des piliers conceptuels d'Aspen HYSYS. Associé aux capacités de sous-flowsheet, il établit les fondements essentiels pour la construction d'une simulation dans Aspen HYSYS. Les fonctionnalités de sous-flowsheet et de colonnes tirent parti de l'architecture de flowsheet multi-niveaux, offrant ainsi une approche souple et intuitive pour élaborer la simulation.

Imaginons que vous deviez simuler une grande installation de traitement comprenant plusieurs unités de traitement distinctes. Plutôt que de regrouper tous les flux de processus et les opérations unitaires dans un seul flowsheet, vous pouvez simuler chaque unité de traitement dans son propre sous-flowsheet. Cela permet une organisation plus claire et une gestion plus efficace de la simulation. [28]

V.3.2.4. La vue Propriété dans Aspen HYSYS

Dans Aspen HYSYS, la vue Propriété constitue un outil essentiel pour l'analyse des schémas de procédés. Elle offre un aperçu détaillé des propriétés des flux et des opérations, en fonction des conditions actuelles du schéma de procédé. Par exemple, la vue des propriétés des flux présente des informations sur toutes les phases présentes dans

le flux, tandis que pour certaines opérations, des pages spécifiques affichent des profils de performance, des résultats et d'autres données analytiques. [28]

V.4. Les types de modèles thermodynamiques

Les modèles thermodynamiques sont fréquemment employés en vue de déterminer les caractéristiques thermodynamiques et volumétriques, ainsi que l'état des composants et des mélanges.

Parmi les modèles thermodynamiques existants, on cite:

- Modèles basés sur les équations d'état : Ces modèles reposent sur des équations d'état qui dépeignent le comportement thermodynamique des mélanges, parmi lesquels figurent des formulations telles que celles de Peng-Robinson, Soave-Redlich-Kwong et Lee-Kesler
- Modèles de la solution idéale : Ces modèles présument que les composants d'un mélange se conforment aux principes de la solution idéale. Parmi eux, on retrouve des formulations telles que le modèle de Raoult, le modèle de Wilson et le modèle de NRTL
- Modèles de la solution régulière : Ces formulations s'appuient sur la théorie de la solution régulière, qui envisage les interactions entre les molécules comme étant uniformes. Parmi elles figurent des modèles tels que le modèle UNIQUAC, le modèle UNIFAC et le modèle ASOG.
- Modèles de la solution électrolytique : Ces formulations sont employées afin de modéliser des mélanges contenant des électrolytes. Parmi elles figurent des modèles tels que le modèle de Debye-Hückel et le modèle de Pitzer.

On peut citer quelques équations d'état ci-dessous :

- ✓ **Équation d'état de Van der Waals** : En 1873, Johannes Van der Waals a établi que la pression interne (P) est en corrélation inverse avec le carré du volume molaire (V). Cette relation est exprimée par l'équation suivante : [29]

$$(P + a/V^2) \times (V - b) = RT$$

Ou :

a et b : des constantes propres au corps pur (a). Le paramètre "a" quantifie l'intensité de l'attraction entre les molécules, également désigné comme la pression de liaison, tandis que le paramètre "b" correspond au covolume mentionné précédemment.

Le terme (V - b) : le volume moléculaire effectif dans la contribution de répulsion.

- ✓ **Équation d'état de Redlich Kwong** : En 1949, Redlich et Kwong ont présenté une nouvelle formulation d'équation d'état, comportant une modification du terme d'attraction de l'équation de Van der Waals, ainsi qu'une variation du paramètre (a) en fonction de la température. Connu sous l'appellation "RK", ce modèle se distingue par sa précision accrue par rapport à celui de Van der Waals, notamment dans le contexte de la phase vapeur. Toutefois, son application ne présente pas d'amélioration notable dans le calcul des équilibres entre liquide et vapeur : [30]

$$P = RT/(V - Bi) - ai.T/ V(V - bi)$$

- ✓ **Équation de Soave, Redlich et Kwong (SRK)** : En 1972, Soave a embrassé la proposition de Wilson en substituant le terme attractif de l'équation de Redlich-Kwong par une fonction $\alpha = f(T, \omega)$, incorporant ainsi l'influence de la température. Cette approche, appelée équation de Soave-Redlich-Kwong (SRK), se définit comme suit : [31]

$$P = RT/(Vm - b) - (a\alpha)/ Vm(Vm + b)$$

Avec :

- $a = 0.42748R^2 Tc^2 / Pc$ avec Tc et Pc sont la pression et la température critique.
- $b = 0.08664RTc/Pc$
- Tc et Pc sont la pression et la température critiques.

L'équation de Soave-Redlich-Kwong demeure l'une des méthodes les plus préférées pour aborder les enjeux industriels, aux côtés de l'équation de Peng et Robinson. Toutefois, elle maintient une valeur constante du facteur de compressibilité critique ($Zc = 0,333$), laquelle demeure trop élevée en comparaison avec les valeurs expérimentales observées. Cette divergence se manifeste essentiellement par un écart significatif lors du calcul des volumes molaires de la phase liquide, bien que l'amélioration majeure réside dans la représentation des lois de tension de vapeur, excepté à de basses températures réduites. [31]

- ✓ **Équation de Lee, Kesler, Plöcker** : L'équation de Lee, kesler, Plöcker (1975-1978) a été établie pour le calcul des propriétés résiduelles : [32]

$$Z = PV/RT$$

La technique élaborée par Lee, Kesler et Plöcker peut également être étendue aux mélanges, en introduisant des paramètres pseudo-critiques. Elle se distingue par une précision remarquable dans le calcul des propriétés résiduelles. Tout en demeurant fidèle à ses fondements, elle peut être ajustée selon les besoins spécifiques d'un problème donné. Toutefois, il est conseillé d'exercer une certaine prudence lors du traitement de fluides caractérisés par un facteur acentrique sensiblement supérieur à celui du fluide de référence (0,3978). Il est à noter que cette équation n'est pas applicable aux composés polaires. [32]

- ✓ **Modèle Peng Robinson** : Les équations d'état RK et SRK présentent une tendance à sous-estimer la densité liquide et adoptent une valeur universelle assez élevée du facteur de compressibilité critique Z (0,33), comparée à la moyenne Z_c des hydrocarbures, qui s'élève à (0,29). En réponse à cette limitation, Peng et Robinson ont formulé en 1976 une nouvelle équation d'état, désignée sous l'abréviation PR76. Dans cette formulation, le terme attractif de l'équation de Van der Waals est à nouveau ajusté, et la fonction $a(T)$ est rendue dépendante du facteur acentrique, conformément à l'approche de Soave. L'équation de Peng-Robinson est définie comme suit : [33]

$$P = RT / (V - b) - a / (V^2 + 2bV - b^2)$$

Avec :

➤ $a = 0.4572R^2T_c^2/P_c$

➤ $b = 0.07780RT_c/P_c$

L'équation d'état de Peng-Robinson présente un coefficient de 0,307, ce qui se rapproche davantage de la réalité. De plus, la prédiction de la densité liquide a été améliorée. Les divergences observées varient entre 5% pour des températures réduites inférieures à 0,65 et 15% aux abords du point critique. Dans l'ensemble, cette nouvelle formulation d'équation d'état, bien qu'elle ne soit pas parfaite, offre une meilleure estimation des pressions de vapeur pour les substances pures par rapport à l'équation SRK, et surtout, une restitution plus précise de la densité en phase liquide ainsi qu'une meilleure représentation des équilibres liquide-vapeur pour de nombreux mélanges. [33]

- ✓ **Modèle Chao Seader** : Le modèle Chao-Seader, datant de 1961, représente une méthode semi-empirique antérieure. Son application est courante dans le calcul de l'équilibre liquide-vapeur pour les hydrocarbures lourds et l'hydrogène, notamment lorsque la pression est inférieure à 1500 psi et que la température se situe entre -17,78°C et 260°C. [34]

- ✓ **Modèle Grayson Streed** : La méthode Grayson-Streed (GS) constitue une approche semi-empirique plus ancienne. Cette corrélation, dérivée de la méthode Chao-Seader, se focalise particulièrement sur l'hydrogène. Elle est préconisée pour les systèmes opérant sous des pressions et des températures élevées. La corrélation GS est particulièrement recommandée pour la modélisation des systèmes composés d'hydrocarbures lourds à forte teneur en H₂, tels que les installations de traitement hydrogénant. Elle peut également être employée pour simuler les unités de distillation primaire et les fractions lourdes sous vide, ainsi que pour calculer les fugacités des phases liquides pour le N₂, le CO₂ et le H₂S. [34]

- ✓ **Modèle UNIQUAC** : L'UNIQUAC (Universal Quasi-Chemical) représente un modèle thermodynamique conçu pour anticiper les propriétés des solutions résultant du mélange de divers composés. Il a été formulé en 1975 par Pedersen, Fredenslund, Jones et Prausnitz, et jouit d'une large utilisation dans les secteurs de l'industrie chimique et pétrochimique pour la planification et l'optimisation des processus de séparation. [35]

Basé sur une théorie de l'énergie libre de mélange inspirée de la théorie des solutions quasi-chimiques, le modèle UNIQUAC prend en considération les interactions entre les molécules de différentes espèces présentes dans la solution. Ces interactions sont évaluées à l'aide de paramètres de correction de l'enthalpie libre d'activation, qui sont déterminés expérimentalement pour chaque système de mélange de composés. En utilisant le modèle UNIQUAC, il est possible de prédire diverses propriétés telles que les coefficients d'activité, les équilibres de phase liquide-liquide et liquide-vapeur, ainsi que les capacités calorifiques et les viscosités des solutions résultant du mélange de composés. [35]

V.5.Utilisation des modèles thermodynamiques dans l'industrie

Les équations de Peng-Robinson (1976) et de Soave-Redlich-Kwong (1972) sont largement adoptées dans l'industrie, en particulier dans le raffinage et la simulation des réservoirs. Leur attrait réside dans leur exigence minimale en termes de données expérimentales (coordonnées critiques et facteur acentrique), leur temps de simulation relativement court, et surtout dans leur capacité à fournir une estimation précise des

équilibres liquide-vapeur pour les hydrocarbures, essentiels dans la conception des procédés.

Cependant, ces équations présentent des limitations significatives. Par exemple, elles sous-estiment les densités liquides et leurs paramètres ne conviennent pas aux fluides non hydrocarbures, en particulier les fluides polaires. De plus, malgré toute modification apportée, il est difficile de représenter de manière satisfaisante le voisinage du point critique sans appliquer une correction pour tenir compte des fluctuations de densité dans cette région. [36]

Tableau V-1 Les utilisations des modèles thermodynamique pour les processus industriels.

Modèle	Application
CPA, PR, SRK, Glycol package	Etude de formation d'hydrate
Glycol package, CPA	Déshydratation du gaz
PR, SRK	Traitement du gaz (séparation et fractionnement)
	Procédé de GNL
	ATM. CDU
UNIQUAC	Mélanges polaires (non idéaux)
CPA, PR, SRK	Injection du méthanol

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

**Chapitre.VI. Étude du
fonctionnement de l'extracteur C203-601
par simulation**

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

VI.1. Introduction et méthodologie du travail

Au cours de notre stage pratique au niveau de la RA1D, nous avons mené une évaluation approfondie de la section de traitement chimique du procédé de craquage catalytique.

L'objectif était de suivre la colonne d'extraction C203-601 par une étude des paramètres opératoires de cette dernière afin d'améliorer le processus d'élimination de H₂S contenu dans le GPL obtenu à partir de l'unité de craquage catalytique RFCC et l'unité de la distillation atmosphérique (topping) CDU.

Dans ce travail, nous allons réaliser une simulation par ASPEN HYSYS V11 de la section de traitement de GPL (extraction et régénération) en utilisant trois types d'amine dans les conditions du fonctionnement actuel de l'extracteur C203-601. L'intérêt de cette étude est de connaître le comportement du procédé en fonction du type d'amine utilisé. En effet, les amines MEA, DEA et MDEA ne sont pas toujours disponibles sur le marché.

Après la réalisation de la simulation, nous passons à l'étude où on analyse l'influence des paramètres opératoires de fonctionnement de la colonne d'extraction sur la teneur en H₂S dans le GPL désulfuré pour les trois types d'amine.

Les paramètres étudiés sont :

- La température de l'amine à l'entrée de l'extracteur.
- Le taux de solvant utilisé.

VI.2. Les données liées à l'extracteur C203-601

L'extracteur C203-601 travaille dans les conditions résumées ci-dessous :

- **Les paramètres et les compositions de l'alimentation de la colonne C.203601:**

- ✓ Pour les paramètres et la composition liés à la charge (GPL) :

Tableau VI-1 Composition de la charge GPL.

Paramètre	Valeur
Température, °C	25
Pression, bars	12

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

Débit massique, Kg/hr	4460
H ₂ S, ppm	3400

Tableau VI-2 Composition de la charge GPL.

Fraction	Valeur
Ethane	0.0069
Propane	0.1431
i-butane	0.1921
n-butane	0.1068
i-pentane	0.004
n-pentane	0.0004
Propène	0.3387
Trs2-Butène	0.0357
i-butène	0.0634
Cis2-butène	0.0361
1-butène	0.0656
H ₂ O	0.004
H ₂ S	0.0034

- Pour les trois types d'amine, on a utilisé les mêmes conditions opératoires pour le fonctionnement de l'extracteur :

Tableau VI-3 L'amine pauvre (solvant) à l'alimentation.

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Température, °C	25	H ₂ S, ppm	300
Pression, bars	12	Concentration en amine	30%
Débit massique, Kg/hr	4104	H ₂ O	70%

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

- Les données mentionnées ci-dessus utilisées en simulation sont les données du cas actuel qui sont les mêmes que celles du cas de design.

VI.3. Simulation de l'unité 600 de traitement du GPL

Dans cette partie, on va utiliser les données mentionnées ci-dessus pour simuler la colonne d'extraction du H₂S du GPL par l'amine et la colonne de régénération du solvant. La simulation nous permettra de faire une étude de l'influence des paramètres opératoires sur le fonctionnement de la colonne d'extraction C203-601.

VI.3.1. Le choix du modèle thermodynamique

Nous avons choisi l'équation de « **Gaz acide liquid traitement** » comme modèle thermodynamique en raison de son efficacité et de sa grande précision pour la résolution de systèmes d'extraction liquide-liquide et de régénération. Ce modèle est adapté pour une large gamme de conditions et d'échelles.

Il est utile pour les procédés d'élimination des gaz acides. Son modèle de propriété d'amine est disponible sur une option avec Aspen HYSYS nous donnant accès à un modèle prouvé de propriété pour la simulation fiable pour l'utilisation d'amine, tout en maintenant la capacité d'employer les possibilités d'écoulement puissantes dans l'Aspen HYSYS.

VI.3.2. Schémas de la simulation de la colonne d'extraction et de régénération

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

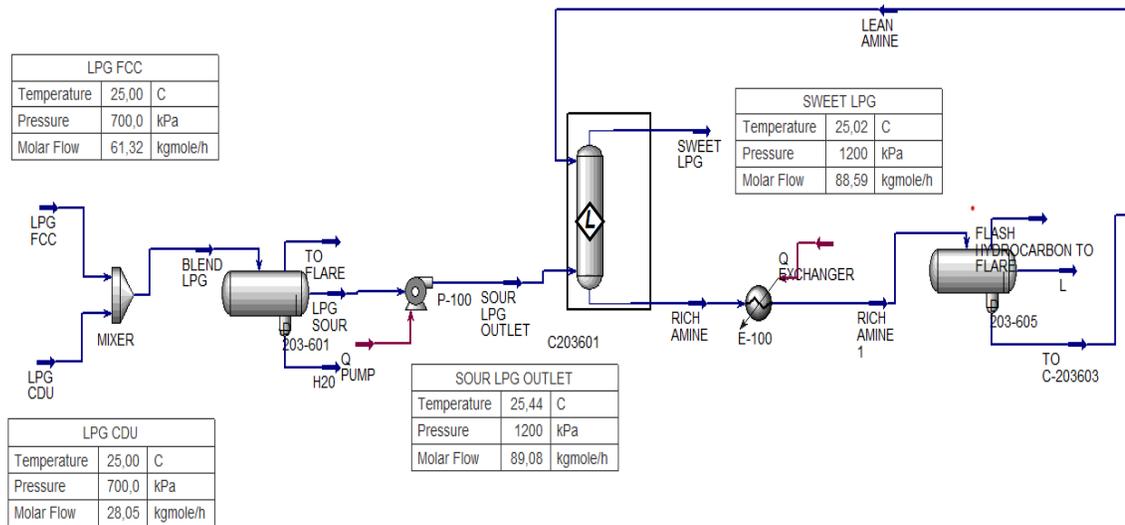


Figure VI-1 Schéma de simulation de l'extracteur de l'unité 600 de traitement du GPL par amine.

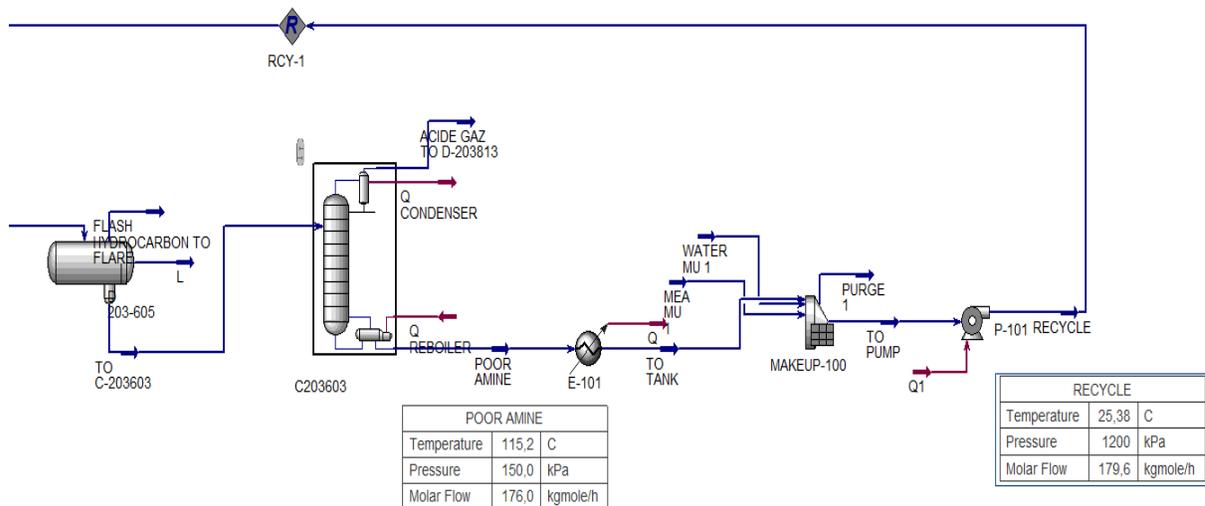


Figure VI-2 Schéma de simulation de régénérateur de l'unité 600 de traitement du GPL par amine.

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

- ✓ **Remarque** : comme il est déjà mentionné ci-dessus, on a simulé le même procédé pour les trois types d'amine.
- ✓ Les trois types d'amine utilisés sont : monoéthanol-amine, diéthanol-amine, méthyl-diéthanol-amine.

VI.4. Résultats de la simulation

Vu que notre travail est basé sur l'élimination du H₂S de GPL par l'amine, on doit présenter donc la composition du GPL après le procédé de désulfuration.

Les résultats sont présentés dans les tableaux VI.4-VI.12, le taux d'extraction de chaque constituant a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Taux d'extraction} = \frac{[(\text{Débit d'entrée} \times \text{Fraction d'entrée}) - (\text{Débit de sortie} \times \text{Fraction de sortie})]}{(\text{Débit d'entrée} \times \text{Fraction d'entrée})}$$

- ✓ **En utilisant le MEA :**

Tableau VI-4 Composition du GPL à la sortie d'extracteur en utilisant MEA.

Fraction	Valeur (fraction mol)	Taux d'extraction (%)
Ethane	0.0069	0.55%
Propane	0.1430	0.61%
i-butane	0.1920	0.60%
n-butane	0.1068	0.55%
i-pentane	0.0040	0.55%
n-pentane	0.0004	0.55%
Propène	0.3376	0.87%
Trs2-Butène	0.0355	1.10%
i-butène	0.0631	1.02%
Cis2-butène	0.0359	1.1%
1-butène	0.0653	0.10%
H ₂ O	0.0006	14.75%

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

H₂S	0.0014	99.99%
MEAmine	1.013 ^E -9	

Tableau VI-5 Paramètres de sortie du GPL désulfuré en utilisant MEA.

Paramètre	Valeur
Température, °C	25
Pression, bars	12
Débit massique, Kg/hr	4436

On peut aussi présenter les paramètres de l'amine riche à la sortie de la colonne d'extraction dans le tableau en dessous :

Tableau VI-6 Paramètres d'amine riche à la sortie de la colonne en utilisant MEA.

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Température, °C	26.28	H ₂ S, ppm	2000
Pression, bars	12	Concentration DEA	30%
Débit massique, Kg/hr	4119	H ₂ O	70%

✓ **En utilisant DEA :**

Tableau VI-7 Composition du GPL à la sortie d'extracteur en utilisant DEA.

Fraction	Valeur (fraction mol)	Taux d'extraction (%)
Ethane	0.0069	0.53%
Propane	0.1430	0.60%
i-butane	0.1920	0.59%
n-butane	0.1068	0.53%
i-pentane	0.0040	0.53%
n-pentane	0.0004	0.53%

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

Propène	0.3381	0.71%
Trs2-Butène	0.0356	0.74%
i-butène	0.0632	0.69%
Cis2-butène	0.0360	0.81%
1-butène	0.0653	0.69%
H ₂ O	0.0006	14.74%
H ₂ S	2.480E-9	99.99%
DEAmine	0.0015	

Tableau VI-8 Paramètres de sortie du GPL désulfuré en utilisant DEA.

Paramètre	Valeur
Température, °C	25.03
Pression, bars	12
Débit massique, Kg/hr	4437

On peut aussi présenter les paramètres de l'amine riche à la sortie de la colonne d'extraction dans le tableau ci-dessous :

Tableau VI-9 Paramètres d'amine riche à la sortie de la colonne en utilisant DEA.

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Température, °C	26.35	H ₂ S, ppm	2300
Pression, bars	12	Concentration DEA	30%
Débit massique, Kg/hr	4118	H ₂ O	70%

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

✓ En utilisant MDEA :

Tableau VI-10 Composition du GPL à la sortie d'extracteur en utilisant MDEA.

Fraction	Valeur (fraction mol)	Taux d'extraction (%)
Ethane	0.0069	0.56%
Propane	0.1430	0.63%
i-butane	0.1920	0.61%
n-butane	0.1068	0.56%
i-pentane	0.0040	0.56%
n-pentane	0.0004	0.56%
Propène	0.3378	0.82%
Trs2-Butène	0.0356	0.83%
i-butène	0.0632	0.87%
Cis2-butène	0.0360	0.83%
1-butène	0.0654	0.68%
H ₂ O	0.0006	14.76%
H ₂ S	5,58E-11	99.99%
MDEAmine	0.0015	

Tableau VI-11 Paramètres de sortie du GPL désulfuré en utilisant MDEA.

Paramètre	Valeur
Température, °C	24.94
Pression, bars	12
Débit massique, Kg/hr	4435

On peut aussi présenter les paramètres de l'amine riche à la sortie de la colonne d'extraction dans le tableau ci-dessous :

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

Tableau VI-12 Paramètres d'amine riche à la sortie de la colonne en utilisant MDEA.

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Température, °C	25.72	H ₂ S, ppm	2500
Pression, bars	12	Concentration MDEA	30%
Débit massique, Kg/hr	4119	H ₂ O	70%

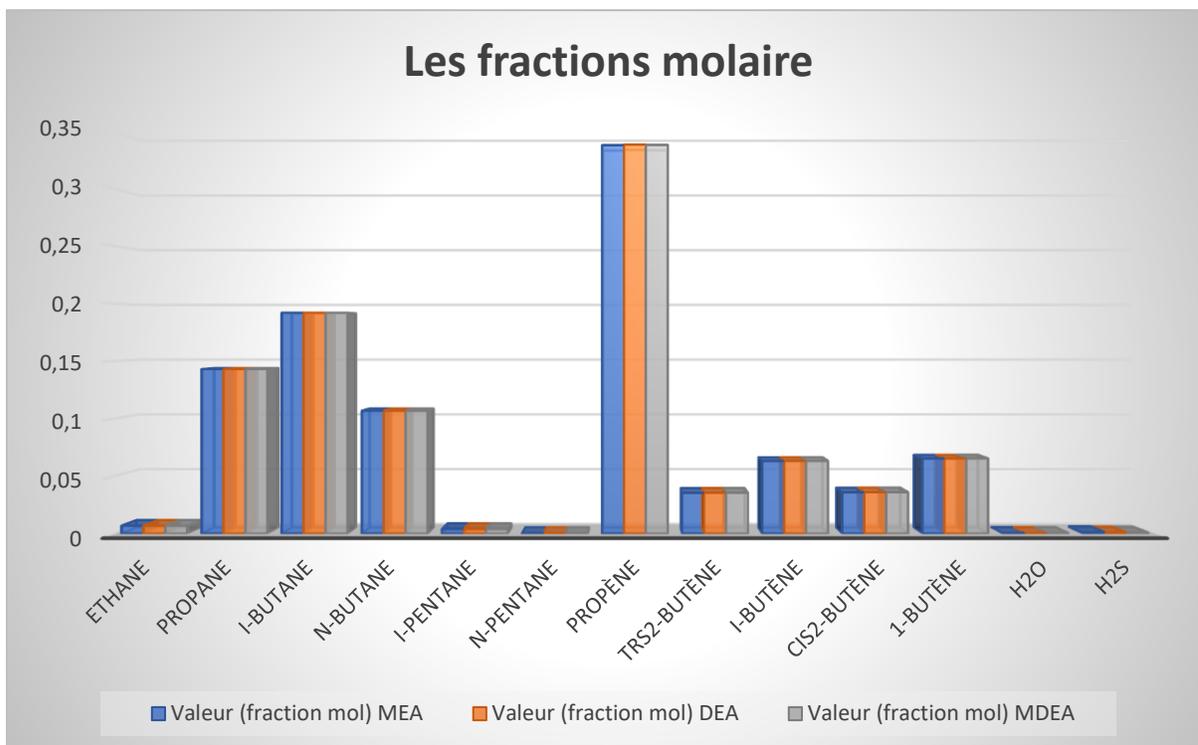


Figure VI-3 Les fractions molaires de la composition du GPL à la sortie de la colonne de désulfuration en utilisant la MEA, DEA et la MDEA

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

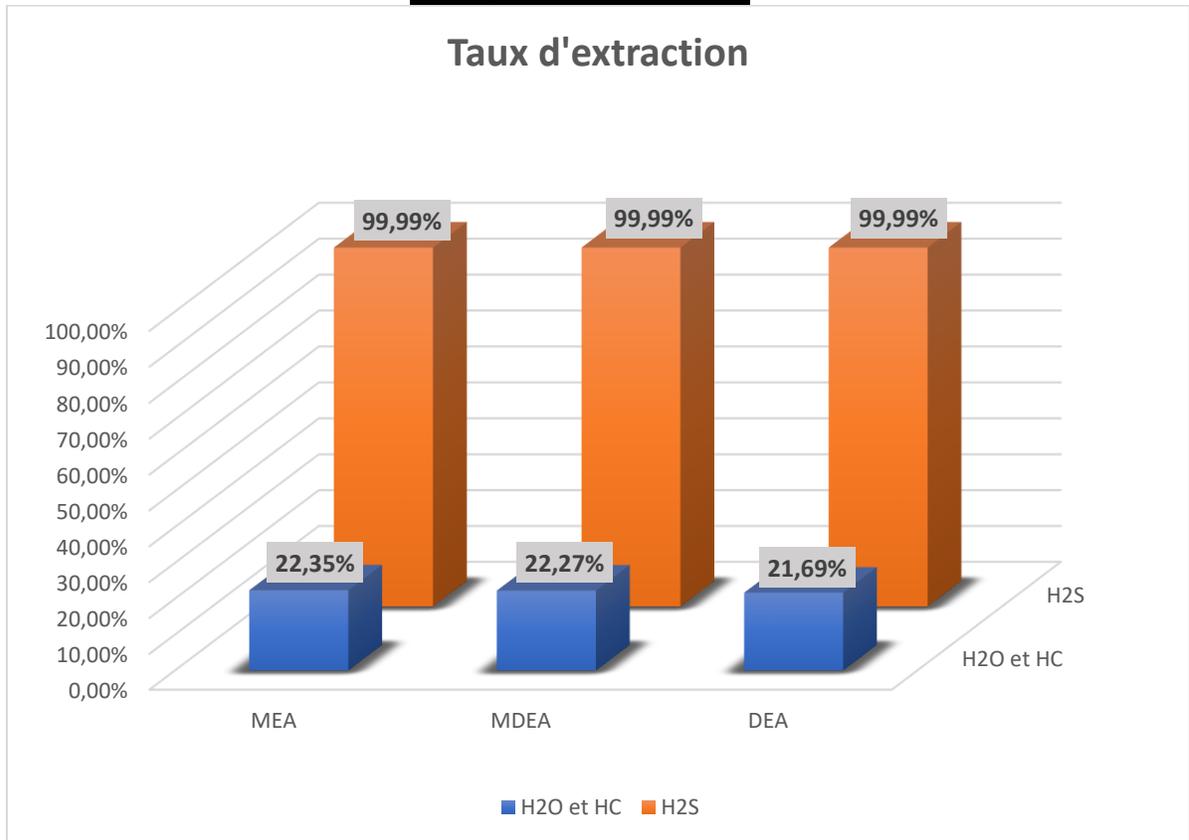


Figure VI-4 Taux d'extraction de H₂S et H₂O+HC par MEA, DEA et MDEA.

➤ **Interprétation des résultats obtenus à partir du simulateur HYSYS :**

Les simulations effectuées avec HYSYS pour l'unité de désulfuration du GPL en utilisant des solutions de monoéthanolamine (MEA), diéthanolamine (DEA) et méthyl diéthanolamine (MDEA) montrent que les trois amines peuvent réduire efficacement la teneur en H₂S pour répondre aux normes.

Cependant, la MDEA s'est distinguée par une efficacité notablement supérieure. Les résultats ont révélé que la MDEA parvient à diminuer la concentration de H₂S de manière plus significative que la MEA et la DEA.

Cette performance accrue de la MDEA peut être attribuée à ses caractéristiques chimiques distinctes. La MDEA possède une affinité plus élevée pour le H₂S, ce qui lui permet d'éliminer ce composé avec une plus grande efficacité. En conséquence, elle réussit à atteindre des niveaux de H₂S plus bas dans le gaz traité.

La figure VI.4 montre clairement que le taux d'extraction des autres composants du GPL (H₂O+HC) est pratiquement le même pour les trois solvants ce qui indique qu'ils ont des sélectivités comparables.

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

En résumé, bien que les trois types d'amines soient efficaces pour la désulfuration du GPL, les propriétés spécifiques de la MDEA en font l'option la plus performante pour réduire les concentrations de H₂S de manière optimale.

VI.5. L'étude d'influence des paramètres opératoires sur le fonctionnement de l'extracteur C203-601

Après avoir fait la simulation en utilisant les trois solvants, on va faire une analyse pour étudier l'influence des paramètres opératoires sur le fonctionnement de l'extracteur C203-601 et la concentration de H₂S dans le GPL traité par le solvant. Les paramètres suivis sont :

- La température d'entrée du solvant ;
- La concentration de l'amine dans le solvant.

VI.5.1. La température

C'est un paramètre très essentiel pour le fonctionnement de l'extracteur C203-601 et l'élimination de H₂S de GPL. Grâce à l'utilisation de la fonction Study case de HYSYS, on a obtenu les variations des fractions de H₂S du GPL désulfuré en fonction de la température d'entrée du solvant.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

- Le cas du MEA :

Tableau VI-13 Les variations de H₂S dans le GPL désulfuré en fonction de la température de MEA pauvre.

MEA	
T°C	H₂S (ppm)
25	0,001013
26	0,001255
27	0,001470
28	0,001470
29	0,001526
31	0,001597
32	0,001838
33	0,001968
34	0,002025

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

35	0,002282
----	----------

On représente ces résultats sous forme d'un diagramme ci-dessous :

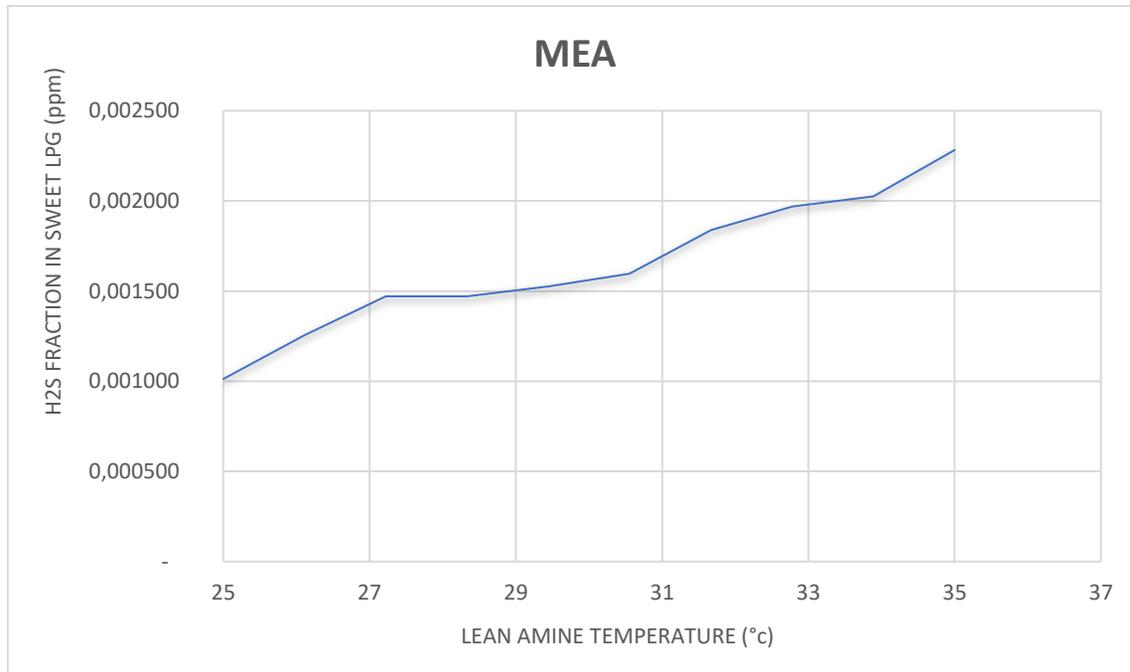


Figure VI-5 Diagramme représentant les variations de H₂S dans le GPL désulfuré en fonction de la température de MEA pauvre.

➤ **Le cas du DEA :**

Tableau VI-14 Variations de H₂S dans le GPL désulfuré en fonction de la température de DEA pauvre.

DEA	
T°C	<i>H₂S (ppm)</i>
25	0,002480
26	0,002594
27	0,002700
28	0,002828
29	0,002954
31	0,003085
32	0,003220

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

33	0,003361
34	0,003508
35	0,003660

On représente ces résultats sous forme d'un diagramme ci-dessous :

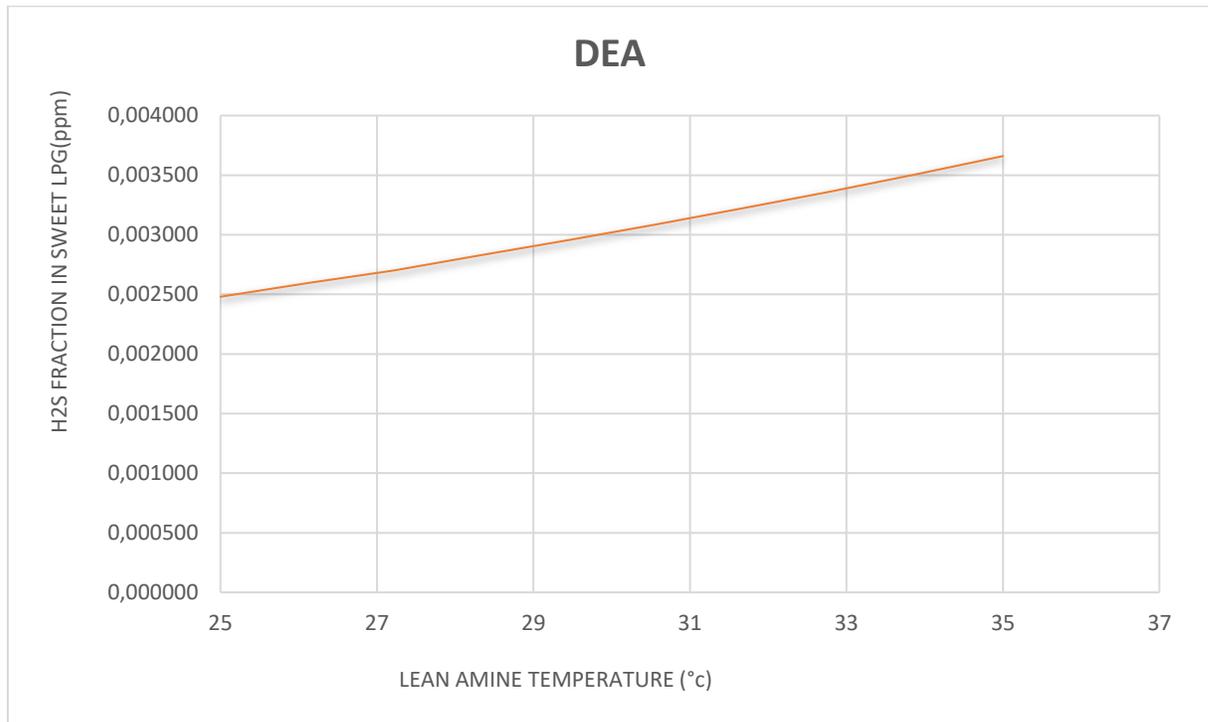


Figure VI-6 Diagramme représentant les variations de H₂S dans le GPL désulfuré en fonction de la température de DEA pauvre.

➤ **Le cas du MDEA :**

Tableau VI-15 Variations de H₂S dans le GPL désulfuré en fonction de la température de MDEA pauvre.

MDEA	
T°C	<i>H₂S (ppm)</i>
25	5,58E-05
26	5,80E-05
27	6,01E-05
28	6,23E-05
29	6,49E-05

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-

601 par simulation

31	6,74E-05
32	6,99E-05
33	7,25E-05
34	7,52E-05
35	7,80E-05

On représente ces résultats sous forme d'un diagramme ci-dessous :

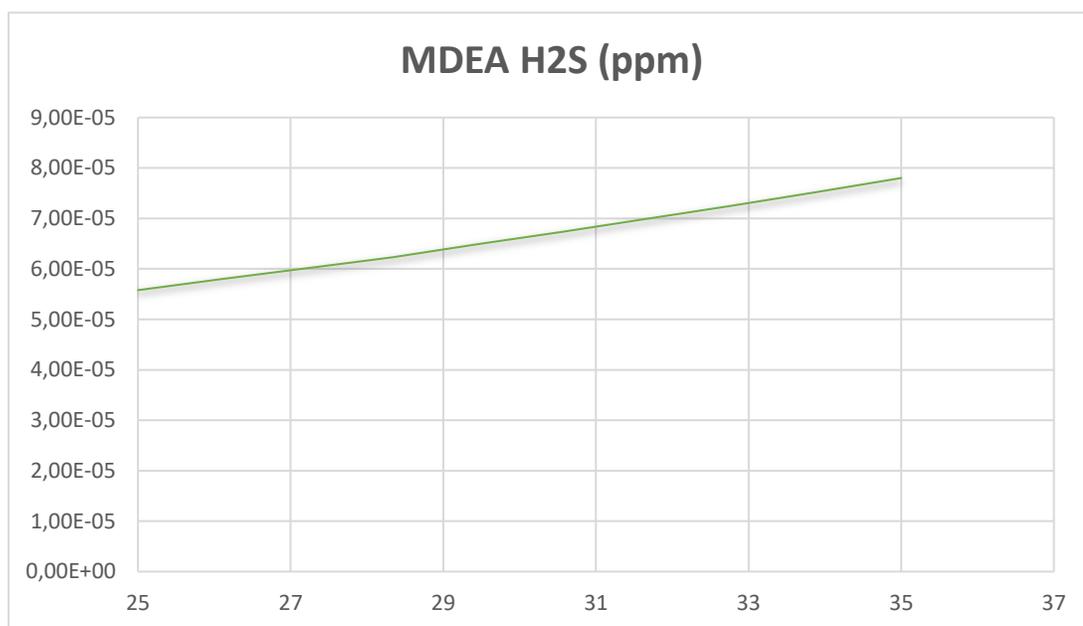


Figure VI-7 Diagramme représentant les variations de H₂S dans le GPL désulfuré en fonction de la température de MDEA pauvre.

➤ **Interprétation des résultats :**

Selon la théorie abordée dans les chapitres précédents, la température de la colonne joue un rôle crucial dans le contrôle de l'extraction de H₂S en utilisant un solvant réactif. Les résultats obtenus, présentés dans le tableau et le diagramme ci-dessus, montrent une tendance claire : avec l'augmentation de la température des solutions d'amine pauvres (MEA, DEA, et MDEA), la teneur en H₂S dans le GPL désulfuré augmente. Cela s'explique par la diminution de la solubilité du H₂S dans les solutions d'amine à des températures plus élevées à cause de l'exothermicité de la réaction de la désulfuration. [37]

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

En effet, à des températures plus élevées, l'énergie thermique ajoutée au système réduit l'affinité du H₂S pour l'amine, diminuant ainsi l'efficacité de l'extraction. Pour les trois amines, cette tendance se manifeste par une moindre extraction de H₂S, entraînant des concentrations plus élevées de H₂S résiduel dans le GPL traité. La MDEA, bien qu'elle soit généralement plus efficace à extraire le H₂S à des températures optimales, n'échappe pas à cette règle : son efficacité décroît également avec l'augmentation de la température, bien qu'elle puisse encore rester supérieure à celle de la MEA et de la DEA dans des conditions similaires.

En résumé, bien que la MEA, la DEA et la MDEA puissent toutes réduire efficacement le H₂S dans le GPL, leur performance est fortement influencée par la température. Une augmentation de la température de la colonne réduit la solubilité du H₂S dans les amines, diminuant ainsi l'efficacité de la désulfuration pour les trois types d'amine.

VI.5.2. Concentration de l'amine dans le solvant

Aussi, la concentration de l'amine dans le solvant, un paramètre opératoire important qui a une influence sur le fonctionnement de l'extracteur C206-301.

En faisant une variation de la concentration de l'amine dans le solvant en utilisant ASPEN HYSYS, on note la teneur en H₂S dans le GPL désulfuré.

On résume les résultats obtenus dans les tableaux ci-dessous :

➤ Le cas du MEA :

Tableau VI-16 Variation de H₂S dans le GPL désulfuré en fonction du taux de MEA pauvre.

MEA	
Le taux	H₂S (ppm)
20%	0.001570
25%	0.001159
30%	0.001013
35%	0.000952

On représente ces résultats sous forme d'un diagramme ci-dessous :

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

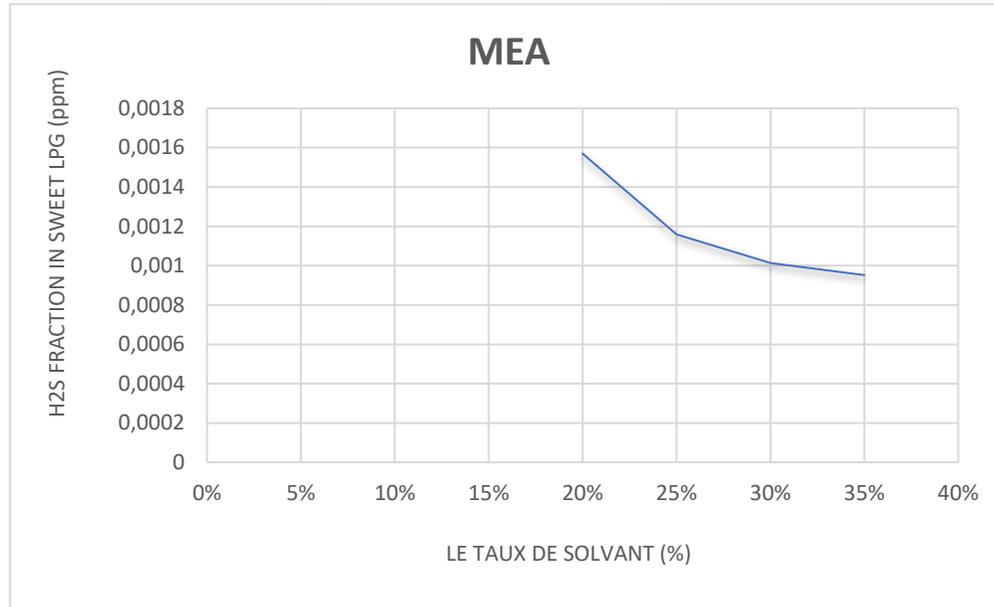


Figure VI-8 Diagramme représentant la variation de la teneur en H₂S dans le GPL désulfuré en fonction du taux de MEA pauvre.

➤ **Le cas du DEA :**

Tableau VI-17 Variation de H₂S dans le GPL désulfuré en fonction du taux de DEA pauvre.

DEA	
Le taux	H ₂ S (ppm)
20%	0.003620
25%	0.003016
30%	0.002480
35%	0.002014

On représente ces résultats sous forme d'un diagramme ci-dessous :

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

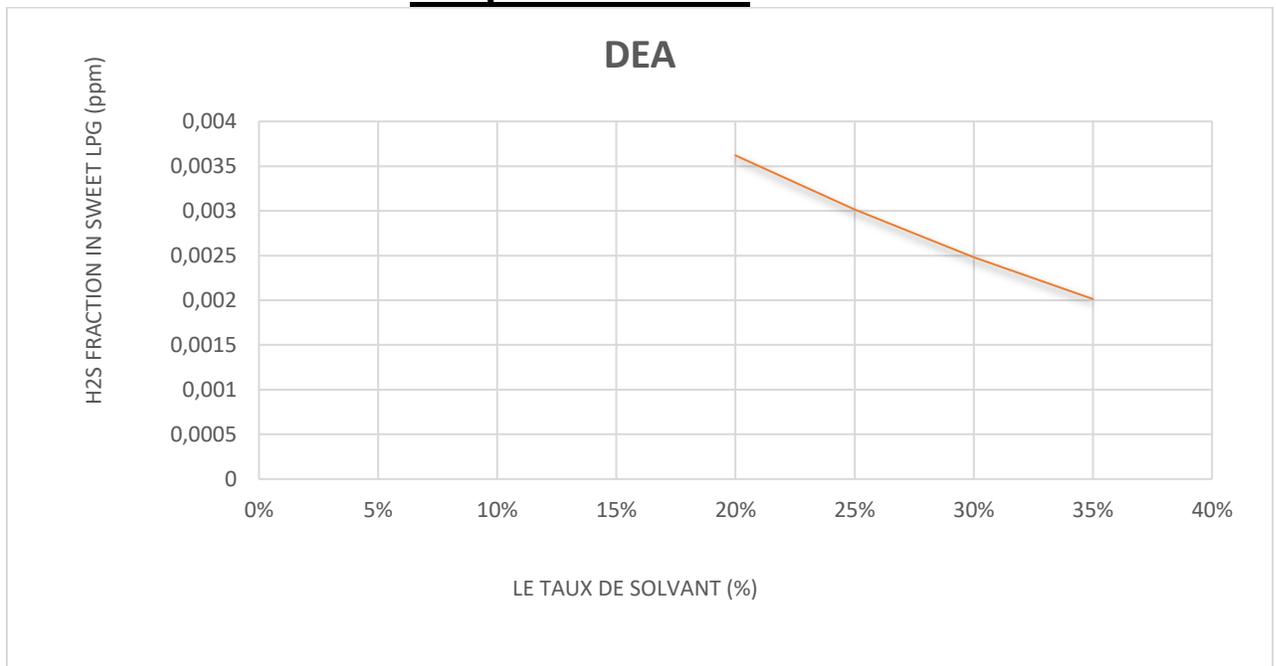


Figure VI-9 Diagramme représentant la variation de la teneur en H₂S dans le GPL désulfuré en fonction du taux de DEA pauvre.

➤ **Le cas du MDEA :**

Tableau VI-18 Variation de H₂S dans le GPL désulfuré en fonction du taux de MDEA pauvre.

MDEA	
Le taux	H ₂ S (ppm)
20%	7.33^{E-5}
25%	6.80^{E-5}
30%	5.58^{E-5}
35%	4.96^{E-5}

On représente ces résultats sous forme d'un diagramme ci-dessous :

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

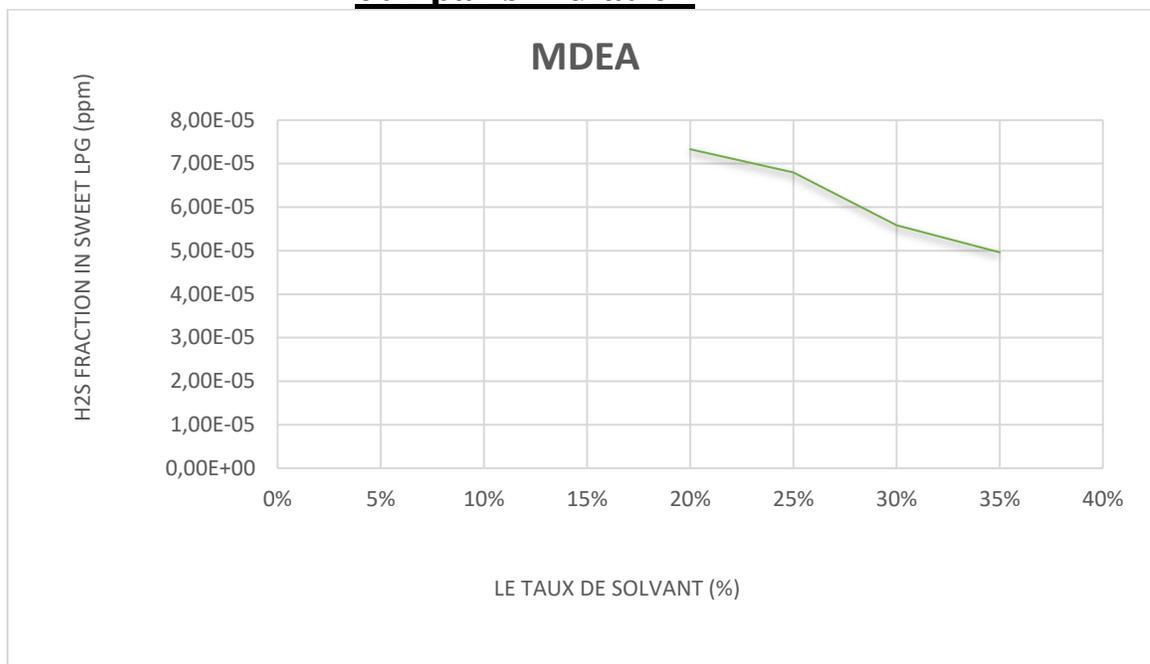


Figure VI-10 Diagramme représentant la variation de la teneur en H₂S dans le GPL désulfuré en fonction du taux de MDEA pauvre.

➤ **Interprétation des résultats :**

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la concentration d'amine dans la colonne de désulfuration améliore l'efficacité de l'extraction de H₂S pour les solutions d'amine MEA, DEA et MDEA. Avec un taux de solvant plus élevé, la teneur en H₂S dans le GPL désulfuré diminue.

Cette observation peut être expliquée par le fait qu'une concentration plus élevée d'amine entraîne un déplacement de la réaction vers l'élimination de H₂S. Ainsi, plus la concentration de l'amine dans le solvant est élevée, plus la capacité de la solution à éliminer le H₂S augmente, ce qui conduit à une réduction plus significative de la teneur en H₂S dans le GPL traité.

Pour chaque type d'amine, cette amélioration est notable, mais la MDEA se distingue particulièrement. Bien que la MEA et la DEA voient également leur performance s'améliorer avec l'augmentation du taux de solvant, la MDEA continue de montrer une supériorité relative en raison de sa meilleure capacité d'extraction.

En résumé, l'augmentation du taux de solvant améliore l'efficacité de la désulfuration du GPL pour les trois amines (MEA, DEA et MDEA). Une concentration plus élevée d'amine permet de diminuer davantage la teneur en H₂S dans le GPL désulfuré, avec la MDEA offrant les meilleures performances dans cette configuration. Mais pour des

Chapitre VI Étude du fonctionnement de l'extracteur C203-601 par simulation

raisons économiques et même avec des concentrations moins élevées d'amine dans le solvant, on trouve des bons résultats donc il n'est pas nécessaire d'augmenter la concentration d'amine.

Conclusion générale

Conclusion générale

Après notre étude menée à l'unité de désulfuration du GPL 600-700 dans la raffinerie d'Adrar RA1D, nous avons examiné le fonctionnement de la colonne de désulfuration en utilisant des différents solvants d'amine, la monoéthanolamine (MEA), diéthanolamine (DEA) et la méthyl diéthanolamine (MDEA). Cette démarche vise à évaluer la performance et l'efficacité de chaque solvant dans le processus de désulfuration.

Dans la première partie, l'analyse des simulations effectuées avec ces trois types de solvants révèle que chacun d'eux est efficace pour le processus de désulfuration du GPL. Cependant, la MDEA se distingue particulièrement par sa grande capacité à extraire le H_2S .

Dans la deuxième partie de l'étude, nous avons examiné l'impact de deux paramètres opératoires, à savoir la température et la concentration de l'amine dans le solvant, sur le processus de désulfuration du GPL. Nos résultats ont révélé que l'augmentation de la température du solvant à l'entrée de la colonne de désulfuration est indésirable, car elle entraîne une augmentation de la teneur en H_2S dans le GPL désulfuré. En revanche, nous avons constaté que l'augmentation de la concentration en amine est souhaitable, car elle réduit la teneur en H_2S dans le GPL désulfuré.

Ces résultats confirment que le processus de désulfuration du GPL dans l'unité C600-700 peut être effectué avec succès en utilisant les différentes solutions d'amine, mais que le choix du MDEA serait le plus optimal en raison de sa performance supérieure en termes de réduction de la teneur en H_2S .

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] : Site officiel SONATRACH « [SONATRACH | L'Énergie du Changement](#) ».
- [2] : « PROJET TRANSFORMATION RESSOURCES HUMAINES : LE CAPITAL HUMAIN AU CŒUR DE LA STRATÉGIE DE SONATRACH » disponible sur « [sonatrach-news-nd31-2_60114b4bb1249.pdf \(energy.gov.dz\)](#) ».
- [3] : Fiche technique de la raffinerie d'Adrar.
- [4] : Document raffinerie de Sbaa (unité de production).
- [5] : Manuel opératoire de la CDU de la RA1D.
- [6] : Manuel opératoire de la RFCC de la RA1D.
- [7] : Manuel opératoire de la CRU de la RA1D.
- [8] : Document raffinerie de Sbaa (utilités).
- [9] : Cour « technique d'analyse du pétrole et des coupes pétrolières » Dr. MIMOUN.
- [10] : Site web : « [Gaz de Pétrole Liquéfiés \(GPL\) : définition, composition, chiffres clés sur le butane et le propane \(connaissancedesenergies.org\)](#) ».
- [11] : « Spécifications des GPL » disponible sur « : [Spécifications administratives des GPL - France Gaz Liquides](#) ».
- [12] : Mémoire de fin d'étude : « Étude des fours tubulaires de l'unité GPL-1 à HASSI-MESSAOUD. Septembre 2015 ; P 91 ».
- [13] : Cour « Production des carburants » Dr. MIMOUN.
- [14] : Cour « Procédés de transformations catalytiques » Dr. MIMOUN.
- [15] : Manuel de la RA1D « Étude d'évaluation des risques ».
- [16] : « Technique de l'ingénieur » disponible sur « [www.techniques-ingenieur.fr](#) ».
- [17] : SAYOURI El Houssine « le sulfure d'hydrogéné: Propriétés physio-pharmacologiques et intérêt dans la neuroprotection post-arrêt cardiorespiratoire », thèse de doctorat en Pharmacie, UNIVERSITE DE LORRAINE 2014.
- [18] : Cour « traitement du gaz » Dr. BEDDA.
- [19] : Mémoire de fin d'étude « étude de la capture du CO₂ dans un mélange d'amines » par BRAHIMI.Abdelaziz et MEDKOUR.Noureddine.
- [20] : « Technologie de purification du gaz naturel » disponible sur « Biruh Shimekit and Hilmi Mukhtar. Natural Gas Purification Technologies - Major Advances for CO₂

Separation and Future Directions, Advances in Natural Gas Technology, Dr. Hamid Al-Megren (Ed.), ISBN: 978-953-51-0507-7, InTech, 2012 ».

[21] : Mémoire de fin d'étude « Optimisation des paramètres de fonctionnement d'une unité de décarbonatation du gaz naturel » par MERABTI Slim.

[22]: «types of alkanolamines for Acid Gas Treatment » disponible sur « www.thepetrosolutions.com ».

[23] : « UOP MEROX PROCESS » par G. A. Dziabis : « HANDBOOK OF PETROLEUM REFINING PROCESSES ».

[24] : Schéma DCS salle de contrôle de la RA1D.

[25] : IAP « Initiation au simulateur HYSYS » École de boumerdès UFR : UFR Drilling, Production & Réservoir Engineering.

[26] : Martín, Mahmoud M. El-Halwagi et Mariano. Process Simulation and Optimization in Sustainable Process Engineering. 2012.

[27]: TECH, ASPEN. <https://www.aspentech.com/>.

[28]: AspenTech. Aspen HYSYS user's guide. 2019.

[29] : Vidal, J. Thermodynamique ; Application au génie chimique et à l'industrie pétrolière, édition Technique. 1997.

[30]: J. Redlich, N.S. Kwong. On the thermodynamics of solutions, V-an Equation of state, fugacities of gaseous solutions. 1949.

[31]: Soave, G. Equilibrium constants from a modified Redlich Kwong equation of state, C.E.S. 1972.

[32] : B.I. Lee, M.G. Kesler. A generalized thermodynamic correction based on threeparameter corresponding data, Journal AIChE. 1975.

[33] : Y.D. Peng, D.B.A. Robinson. New two constant equation of state, I.E.C fundamentals. . 1976.

[34] : COMThermo, AspenTech. Aspen COMThermo, Reference guide ASPEN Technology. 2007.

[35] : Fredenslund, A., Jones, R. L., & Prausnitz, J. M. (1975). Group-contribution estimation of activity coefficients in nonideal liquid mixtures. AIChE Journal, 21(6), 1086-1099. Group-contribution estimation of activity coefficients in nonideal liquid mixtures. AIChE Journal. 1975.

[36] : Belkadi, A. Modélisation de la matière avec l'équation saft pour la prédiction des propriétés thermodynamiques des fluides complexes à travers simulis thermodynamics, thèse de Doctorat de l'University de Toulouse. 2008.

[37] : « Technique de l'ingénieur » (j5482) par Julia MAGNE-DRISCH et Sebastien GONNARD.