

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES

Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département Génie des Procédés Chimiques et Pharmaceutiques

Mémoire de Master

Présenté par

MAALLOU Hamida

&

BAHIRI Lilya

Filière : Génie des Procédés

Option : Raffinage

Evaluation des performances des fours F101, F102 et F103 avec et sans la mise en marche du préchauffeur d'air au niveau de l'unité de topping condensat de la raffinerie de SKIKDA (RA2K)

Devant le jury :

	Prof	UMBB	Président
	MCB	UMBB	Examineur
BEDDA Kahina	MCA	UMBB	Encadreur

Année Universitaire : 2020/2021

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université M'Hamed Bougara – Boumerdès

Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

AUTORISATION DE SOUTENANCE

Département : Génie des Procédés Chimiques et Pharmaceutiques

Je soussigné : *Dr BEDDA Kahina*

Enseignant encadrant les étudiants : *MAALLOU Hamida et BAHIRI Lilya*

Du groupe : *MARA/16*

Thème : *Evaluation des performances des fours F101, F102 et F103 avec et sans la mise en marche du préchauffeur d'air au niveau de l'unité de topping condensat de la raffinerie de SKIKDA (RA2K)*

Autorise la soutenance le :

L'encadreur

Remerciements

Louanges à ALLAH le tout puissant, de mettre entre nos mains tous les moyens pour accomplir ce modeste travail.

*Nous tenons à remercier particulièrement notre encadreur **Mme K. BEDDA** pour ses conseils, sa patience, son suivi et son encouragement durant toute la période de la réalisation de ce mémoire.*

Un grand merci pour tous les profs qui ont transmis à leurs étudiants le savoir et le fruit de leurs plusieurs années d'expérience.

*Nous remercions vivement le personnel **RA2K** en particulier **BOUCHEMAL Amel** Et **ZEGLIL Amel***

Enfin, notre sincère gratitude à ceux qui ont été toujours à nos cotés pour nous soutenir ou les personnes que dieu a mis dans notre voie par sa sagesse et qu'ils ont laissé de bons traces dans nos cœurs.

Dédicace

Je dédie ce travail :

*A mon cher père pour sa tendresse sa motivation ses sacrifices pour moi
que dieu l'accueille dans son vaste paradis.*

*A ma chère mère que dieu la protège pour la patience, l'éducation, le
grand amour et toutes les valeurs humaines qu'elle a mis dans mon
cœur.*

A mes chères sœurs qui m'ont toujours souhaité le meilleur.

*A toute ma famille en particulier Nawel LAMROUS et Hamid
MAALLOU.*

A Lilya et sa famille.

*A tous mes amis en particulier : Sirine, Chaima, Nariman, Wissam,
Zahra, Karima, Sanaa.*

A mes profs en particulier Mme K. BEDDA et Mr HADJARAB

A toutes les personnes que j'estime beaucoup

H.MAALLOU

Dédicace

Aujourd'hui, c'est avec honneur que je dédie ce mémoire, fruit de plusieurs années de labeur.

A mes très chers grands parents Habbou Baya et Vava Lhoussine

A mon cher père, pour ses encouragements, ses conseils et son amour éternel.

A ma très chère mère, pour sa tendresse, sa compréhension, sa patience et son soutien.

A mes frères : Saïd, Ali et Mohammed

Comme je dédie ce travail à mes tantes Hasssina, Farida, Djamila, Saliha, Aldjia, Ghania et Sadia, mes oncles, mes cousins et mes cousines.

A ma chère amie Hamida et sa famille,

A mes amies Yasmine, Sara, Sylvia, Chaima et Lynda

A mes profs d'université, enseignants du lycée, collège et primaire

A tous mes camarades de la promotion 2016

A tous ceux qui sèment le bonheur dans mon chemin ^ ^

Et tous ceux que j'aime.

L.BAHIRI

RESUME

Les processus de transfert de chaleur sont très souvent rencontrés dans l'industrie pétrolière. Les problèmes de transfert thermique ont une importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement des équipements thermique tels les fours.

Pour mettre en évidence l'impact du fonctionnement du préchauffeur d'air sur le rendement des fours de l'unité U-100 (RA2K), et bien comprendre l'importance de l'exploitation de l'énergie thermique des fumées, il sera nécessaire de vérifier en premier lieu la performance de ces fours avec et sans fonctionnement du préchauffeur d'air, Ce qui nous permettra de déterminer l'effet de cette nouvelle technologie et de valoriser l'énergie de fuel gaz récupérée.

ABSTRACT

Heat transfer processes are very often encountered in the oil industry. Heat transfer problems are of great importance for the study and operation of thermal equipment such as furnaces.

To highlight the impact of the operation of the air preheater on the performance of the furnaces of the unit U-100 (RA2K), and to understand the importance of the exploitation of the thermal energy of the fumes, it will be necessary to verify first the performance of these furnaces with and without the operation of the air preheater, which will allow us to determine the effect of this new technology and to valorize the energy of fuel gas recovered.

نبذة مختصرة

غالبًا ما تصادف عمليات نقل الحرارة في صناعة البترول. تعتبر مشاكل النقل الحراري ذات أهمية حاسمة لدراسة وتشغيل المعدات الحرارية مثل الأفران.

لتسليط الضوء على تأثير تشغيل التسخين الهوائي على كفاءة أفران وحدة U-100 (RA2K)

وفهم أهمية استغلال الطاقة الحرارية لغازات المداخن ، سيكون من الضروري للتحقق أولاً من أداء هذه الأفران مع تشغيل التسخين الهوائي وبدونه، مما سيتيح لنا تحديد تأثير هذه التقنية الجديدة وتأمين طاقة غاز الوقود المستعاد.

SOMMAIRE

Sommaire.....	i
Liste des abréviations.....	vi
Liste des tableaux.....	viii
Liste des figures.....	xi
Liste des graphes	xiii
Liste des annexes	xiv
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage	
I.1 GENERALITES SUR LE PETROLE BRUT.....	3
I.1.1 Introduction.....	3
I.1.2 L'origine du pétrole brut.....	3
I.1.3 Types de pétrole brut.....	4
I.1.4 Composition d'un pétrole brut.....	5
I.1.4.a Les hydrocarbures purs.....	5
I.1.4.b Les composés autres que les hydrocarbures.....	7
I.2 METHODE ANALYTIQUE POUR LA CARACTERISATION DES PETROLES BRUTS ET DES COUPES PEROLIERS.....	12
I.3 GENERALITES SUR LA DISTILLATION ATMOSPHERIQUE.....	13
I.3.1 Introduction aux principes de la distillation.....	13
I.3.2 La distillation atmosphérique.....	13
I.3.3 Les produits pétroliers.....	14
I.3.4 Les produits pétroliers.....	14
I.3.5 Le principe du fonctionnement de la colonne.....	15

I.3.6	L'équilibre liquide_vapeur.....	18
I.3.6.a	Les lois d'équilibre des phases liquides-vapeur.....	19
I.3.7	Dimensionnement d'une installation de la distillation.....	20
I.3.8	Les paramètres de la colonne.....	22
I.3.9	Types de distillation au laboratoire.....	24
I.4	GENERALITES SUR LE CONDENSAT.....	24
I.4.1	Origine de condensat.....	24
I.4.2	Usages du condensat.....	25
I.4.2.a	Utilisation du condensat en raffinage.....	25
I.4.3	Condensat Algérien.....	26
I.4.3.a	Qualité de condensat algérienne.....	26
I.4.3.b	Production du condensat algérienne.....	28
I.5	LES NORMES.....	29

Chapitre II : Généralités sur les fours

II.1	INTRODUCTION.....	30
II.2	LES EQUIPEMENTS THERMIQUES.....	31
II.2.1	Les échangeurs de chaleur.....	31
II.2.1.a	Les échangeurs tubulaires.....	31
II.2.1.b	Les échangeurs à plaques.....	32
II.2.2	Les fours.....	33
II.2.2.a	Différents types de fours.....	33
II.2.2.b	Technologie des fours.....	36
II.2.2.c	Caractéristiques des fours.....	41

II.2.2.d	La combustion dans les fours pétroliers.....	42
II.2.2.e	Pouvoir calorifique.....	44
II.2.2.f	Rendement thermique d'un four.....	45
II.2.3	Les préchauffages d'air.....	47
II.2.3.a	Rôle du préchauffeur d'air.....	47
II.2.3.b	Différents types de préchauffeur d'air.....	48
II.2.3.b	Avantages et inconvénients du préchauffeur d'air.....	49
II.3	LES FOUR DU TOPPING CONDENSAT DE SKIKDA.....	50
II.3.1	Principales caractéristiques.....	50
II.3.1	Fonctionnement.....	52
II.4	SECURITE DES FOURS PETROLIERS.....	54
II.4.1	Importance de la sécurité.....	54
II.4.2	Sécurité des bruleurs.....	54
II.4.3	Comportement sécuritaire du personnel.....	55

Chapitre III : Présentation de la raffinerie de SKIKDA (RA2K)

III.1	PRESENTATION DE LA RAFFINERIE DE SKIKDA RA2K.....	57
III.1.1	Introduction.....	57
III.1.2	Historique du complexe Topping (RA2K).....	57
III.1.3	Localisation géographique du site.....	59
III.1.4	Conception générale du complexe.....	60
III.2	FONCTIONNEMENT DE L'UNITE.....	61
III.2.1	Train de préchauffe.....	61

III.2.2 Préfractionnement.....	62
III.2.3 Distillation atmosphérique.....	63
III.2.4 Distillation sous vide.....	64
III.2.5 Stabilisation des essences.....	65
III.2.6 Section de séchage de butane.....	66
III.2.7 Les utilités.....	66

Chapitre IV : Etude énergétique du four (partie calcule)

IV.1 LA PROBLEMATIQUE.....	68
IV.2 L'OBJECTIF DE L'ETUDE.....	69
IV.3 LES PARAMETRES A DETERMINER.....	69
IV.4 LES DONNEES.....	70
IV.5 LA COMPOSITION DE GAZ COMBUSTIBLE.....	73
IV.6 REACTIONS DE COMPBUSTION.....	74
IV.7 COMPOSITION DE COMBURANT.....	75
IV.7.1 La quantité d'oxygène nécessaire à la combustion pour 100 Nm ³ de combustible.....	75
IV.7.2 La quantité d'air nécessaire à la combustion pour 100Nm ³ de combustible.....	76
IV.7.3 La quantité d'azote contenue dans l'air de combustion.....	76
IV.7.4 La teneur de la vapeur d'eau dans l'air de combustion.....	76
IV.8 LES QUANTITES DES PRODUITS DE LA COMBUSTION (COMPOSITION DES FUMEEES).....	77
IV.8.1 Composition des fumées théoriques.....	77
IV.8.2 Composition des fumées réelle.....	78

IV.9 POUVOIR CALORIFIQUE INFERIEUR (PCI) DES CONSTITUANTS DU GAZ COMBUSTIBLE.....	81
IV.9.1 Estimation du PCI du mélange gaz combustible.....	82
IV.9.2 Quantité de la chaleur libérée par la combustion (Qfournie).....	82
IV.10 BILAN THERMIQUE DES TROIS FOURS F101, F102 ET F103.....	83
IV.10.1 Calcul de la chaleur dégagée par l'air Qsair.....	83
IV.10.2 Calcul des pertes de chaleur par fumées.....	87
IV.10.3 Estimation des pertes de chaleur par parois.....	93
IV.10.4 Calcul du rendement thermique dans les trois fours de l'unité 100.....	96
IV.11 ETUDE TECHNICO-ECOOMIQUE LORS DE L'EMPLACEMENT DE L'APH & GAIN ENERGETIQUE.....	99
Conclusion générale.....	102
Bibliographie	104
Annexe.....	106

LISTE DES ABRIVIATIONS

RA1K : La Raffinerie du pétrole de Skikda.

RA2K : La Raffinerie du Condensat de Skikda.

RTE : Le Terminal de stockage du pétrole brut et du condensat .

DCS : Distributed Control System .

U : Unité .

T : Tour .

LGO : Gasoil Léger .

HGO : Gasoil Lourd .

F : Four .

η : Rendement Thermique .

Q : Quantité de chaleur .

T : Température .

PCI : Pouvoir calorifique inferieur .

V : Volume .

n : Débit molaire des fumées .

Cp_{moy} : Chaleur spécifique moyenne des fumées .

T_f : Température de rejet des fumées .

C_{pi} : Chaleur spécifique du constituant i .

y_i : % molaire (égal au % volumique) du constituant i dans les fumées .

V_{va} : Débit du combustible consommé par les trois fours fonctionnent avec le préchauffeur d'air.

V_{vs} : Débit du combustible consommé par les trois fours fonctionnent sans le préchauffeur d'air.

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux	Titres	Pages
Tableau I.1	<i>Structure de composés hydrocarbonés présents dans les produits pétroliers</i>	6
Tableau I.2	<i>Structure de composés soufrés présents dans les produits pétroliers</i>	7
Tableau I.3	<i>Structure de composés azotés présents dans les produits pétroliers</i>	8
Tableau I.4	<i>Structure de composés oxygénés présents dans les produits pétroliers</i>	8
Tableau I.5	<i>Structure de composés métalliques présents dans les produits pétroliers</i>	9
Tableau I.6	<i>les méthodes de calcul et d'analyse pour la caractérisation des pétroles et des coupes pétrolières</i>	12
Tableau I.7	<i>les paramètres du condensat algérien</i>	27
Tableau II.1	<i>les réactions de la combustion</i>	42
Tableau II.2	<i>Les pouvoirs calorifiques de quelques combustibles gazeux</i>	45
Tableau III.1	<i>mode d'exploitation du complexe topping condensat</i>	58
Tableau IV.1	<i>paramètres opératoires de four F101</i>	71
Tableau IV.2	<i>paramètres opératoires de four F102</i>	72
Tableau IV.3	<i>paramètres opératoires de four F103</i>	73
Tableau IV.4	<i>les pourcentages volumiques des constituants pour 100Nm³ de gaz combustible.</i>	74

Tableau IV.5	<i>les quantités théorique de O₂, H₂O et CO₂ contenant dans l'air et les fumées pour 100 Nm³ /h</i>	75
Tableau IV.6	<i>La composition théorique totale des fumées</i>	78
Tableau IV.7	<i>les valeurs des constituants des fumées de la combustion réelle de 100Nm³ de gaz combustible</i>	79
Tableau IV.8	<i>La composition réelle des fumées dans le four F101</i>	80
Tableau IV.9	<i>La composition réelle des fumées dans le four F102</i>	80
Tableau IV.10	<i>La composition réelle des fumées dans le four F103</i>	81
Tableau IV.11	<i>Pouvoir calorifique inférieur (PCI) des constituants du gaz combustible</i>	81
Tableau IV.12	<i>Quantité de chaleur libérée par la combustion dans les trois fours avec et sans APH</i>	82
Tableau IV.13	<i>Le débit volumique réel de l'air introduit dans les trois fours avec et sans APH</i>	85
Tableau IV.14	<i>La masse de l'air pour les trois fours avec et sans APH</i>	85
Tableau IV.15	<i>La chaleur sensible de l'air pour les trois fours avec et sans APH</i>	86
Tableau IV.16	<i>La quantité totale de la chaleur fournie par l'air et le gaz combustible pour chaque four</i>	86
Tableau IV.17	<i>les pertes de chaleur par fumées dans le four 101 avec APH</i>	88
Tableau IV.18	<i>les pertes de chaleur par fumées dans le four 101 sans APH</i>	89
Tableau IV.19	<i>les pertes de chaleur par fumées dans le four 102 avec APH</i>	90

<i>Tableau IV.20</i>	<i>les pertes de chaleur par fumées dans le four 102 sans APH</i>	90
<i>Tableau IV.21</i>	<i>les pertes de chaleur par fumées dans le four 103 avec APH</i>	91
<i>Tableau IV.22</i>	<i>les pertes de chaleur par fumées dans le four 103 sans APH</i>	92
<i>Tableau IV.23</i>	<i>les quantités de chaleur perdues par les fumées dans les trois fours avec et sans APH</i>	92
<i>Tableau IV.24</i>	<i>les pertes de chaleurs par les parois avec et sans l'APH dans les trois fours</i>	93
<i>Tableau IV.25</i>	<i>les quantités de fuel gaz consommé avec et sans APH dans les trois fours</i>	94
<i>Tableau IV.26</i>	<i>le rendement thermique dans les trois fours avec et sans APH</i>	96
<i>Tableau IV.27</i>	<i>le gain réel dans les trois fours</i>	98

LISTE DES FIGURES

Figure	Titres	Pages
Figure I.1	<i>les asphaltènes</i>	9
Figure I.2	<i>la composition générale d'un pétrole brut en pourcentage massique</i>	10
Figure I.3	<i>Tour de distillation atmosphérique</i>	15
Figure I.4	<i>Schéma général du fonctionnement d'une colonne de rectification</i>	16
Figure I.5	<i>Courbe de Rosée et courbe de Bulle "diagramme isobare"</i>	18
Figure I.6	<i>Construction de McCabe et Thiele</i>	20
Figure II.1	<i>les éléments composants un échangeur tubulaire</i>	32
Figure II.2	<i>les éléments composants un échangeur à plaque</i>	32
Figure II.3	<i>Four cabine à tubes horizontaux</i>	34
Figure II.4	<i>Four cylindrique vertical</i>	35
Figure II.5	<i>Schéma simplifié d'un four classique</i>	36
Figure II.6	<i>Exemples d'ancrage au casing de béton et briques réfractaires</i>	40
Figure II.7	<i>préchauffeur d'air intégré</i>	48
Figure II.8	<i>préchauffeur d'air séparé</i>	49
Figure II.9	<i>Le principe de fonctionnement des trois fours avec APH, circuits gaz combustible, air de combustion et fumée</i>	53
Figure III.1	<i>la section de préchauffe</i>	61

<i>Figure III.2</i>	<i>la section préfractionnement de l'unité 100</i>	62
<i>Figure III.3</i>	<i>la section atmosphérique de l'unité 100</i>	63
<i>Figure III.4</i>	<i>la section sous vide de l'unité 100</i>	64
<i>Figure III.5</i>	<i>Section de stabilisation des essences</i>	65
<i>Figure III.6</i>	<i>le schéma synoptique du complexe RA2K</i>	66
<i>Figure III.7</i>	<i>le schéma technologique de l'unité de production 100</i>	67

LISTE DES GRAPHERS

Graphes	Titres	Pages
<i>Graphe IV.1</i>	<i>Quantité de chaleur libérée par la combustion dans les trois fours avec et sans APH</i>	83
<i>Graphe IV.2</i>	<i>La quantité totale de la chaleur fournie par l'air et le gaz combustible pour chaque four</i>	87
<i>Graphe IV.3</i>	<i>les quantités de chaleur perdues par les fumées dans les trois fours avec et sans APH</i>	93
<i>Graphe IV.4</i>	<i>les pertes de chaleurs par les parois avec et sans l'APH dans les trois fours</i>	94
<i>Graphe IV.5</i>	<i>les quantités de fuel gaz consommé avec et sans APH dans les trois fours</i>	95
<i>Graphe IV.6</i>	<i>le rendement thermique dans les trois fours avec et sans APH</i>	97

LISTE DES ANNEXES

Annexes	Titres	Page
<i>Annexe A</i>	<i>Les caractéristiques principales des trois fours 100-F-101, 100-F-102 et 100-F-103 sont reportées dans les tableaux suivants</i>	<i>106</i>
<i>Annexe B</i>	<i>Chaleur spécifique moyenne entre 0°C et t°C en Kcal (°C)⁻¹ (Kmol)⁻¹</i>	<i>109</i>
<i>Annexe C</i>	<i>Data sheet des fours</i>	<i>110</i>
<i>Annexe D</i>	<i>Fiche techniques du Préchauffeur d'air</i>	<i>111</i>

INTRODUCTION GENERALE

Le pétrole brut est l'une des denrées les plus précieuses sur les marchés de la planète. Constituant un peu plus du tiers des réserves énergétiques mondiales, il est vital pour nombre d'industries et de nations. Sa composition se base principalement sur diverses molécules d'hydrocarbures plus au moins lourdes. Selon les gisements, ces molécules sont présentes en proportions variables, qui définissent ses caractéristiques, ainsi, il existe une multitude de bruts.

Le raffinage du pétrole est la transformation du pétrole brut en une palette de produits pétroliers répondant aux exigences des consommateurs et des industriels.

L'Algérie, dès son indépendance, s'est mise à exploiter ses richesses naturelles en hydrocarbures (pétrole brut et gaz naturel). C'est ainsi que sont nées les raffineries de Hassi-Messaoud, In Amenas, Arzew, Skikda et Adrar, après celle d'Alger qui date depuis l'ère coloniale. D'autres, sont en construction ou en projet.

Le projet du complexe de Topping Condensat de Skikda, dénommé RA2K, fait partie du programme du pôle industriel pétrochimique de la région. Le contrat a été signé en 2005 et sa mise en exploitation en 2009.

Durant notre stage pratique dans la raffinerie de Skikda RA2K, on a été affecté vers l'unité de production 100 dans laquelle de nombreux équipements sont utilisés au cours du processus de raffinage notamment, les équipements de traitement et de transformation (colonnes de distillation, mélangeurs...etc) ainsi les équipements thermiques (préchauffeurs, fours, rebouilleurs...etc.) pour la production de naphta d'environ 80% et d'autres produits a partir du condensat comme matière première.

Sur site trois fours sont liées d'une cheminée ayant un préchauffeur d'air installé permettant la récupération de la chaleur perdue par les fumées en la transmettant à l'air entrant dans les bruleurs avec une température plus élevée. L'arrêt de cette nouvelle technologie a attiré notre attention pour faire le thème d'un mémoire de fin d'étude car c'est un moyen très efficace pour augmenter le

rendement thermique des fours comme étant des équipements clés pour l'industrie du raffinage. Ce mémoire comporte quatre chapitres :

- ✓ Le chapitre I renferme des généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage.
- ✓ Le chapitre II est focalisé sur les équipements thermiques en générale et les fours avec plus de détails ainsi les avantages et les inconvénients de l'installation du préchauffeur d'air.
- ✓ Le chapitre III est consacré pour la représentation des différentes unités de la raffinerie topping condensat Skikda.
- ✓ Le chapitre IV c'est la partie pratique ou calcule qui montre l'importance du préchauffeur d'air installé au niveau de l'unité 100 par une étude des rendements thermiques des trois fours F101, F102, F103 aussi le gain énergétique et financier.

Chapitre I

- 1- Généralités sur le pétrole brut.
- 2- Méthodes analytiques pour la caractérisation des pétroles bruts et des coupes pétrolières.
- 3- Propriétés des pétroles bruts et des produits pétroliers.
- 4- Généralités sur la distillation atmosphérique.
- 5- Généralités sur le condensat
- 6- Les normes.

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

I.1 GENERALITES SUR LE PETROLE BRUT

I.1.1 Introduction

Le pétrole est une énergie fossile, utilisée notamment dans plusieurs secteurs citons l'industrie pétrochimique, pharmaceutique, le transport terrestre, maritime et aérien...etc. la première découverte du pétrole brut a eu lieu en Pennsylvanie en XIXe siècle, il se présente sous forme d'une huile minérale provenant de la décomposition sédimentaire des composés organiques contenant du carbone. Une fois extrait des gisements souterrains, ce dernier est transporté par des oléoducs, avant d'être raffiné, c'est-à-dire transformé.

I.1.2 L'origine du pétrole brut

La transformation de la matière organique en pétrole s'échelonne sur des dizaines de millions d'années, en passant par une substance intermédiaire appelée kérogène. Le pétrole produit se trouve piégé dans des formations géologiques particulières, appelées « roches réservoirs » constituant les gisements pétrolifères « conventionnels » exploités de nos jours.

La matière organique est issue de la transformation des résidus des êtres vivants (plancton, végétaux, animaux...etc.). Composée généralement de carbone et d'hydrogène. Elle forme ce que l'on appelle « la biomasse » préservée dans un environnement pauvre en oxygène ; Elle se mélange ensuite à des matières minérales créant ainsi des boues de sédimentation. Celles-ci s'accumulent par couches successives sur des dizaines voir des centaines de mètres.

Puis, sous l'action des bactéries anaérobies ainsi les hautes températures elle se transforme en kérogène. Il s'agit d'un composé solide disséminé sous la forme de filets au sein des sédiments.

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

Le kérogène est piégé dans une roche relativement imperméable appelée « roche mère » qui présente des conditions géothermiques de plus en plus élevées, ce qui brise les liaisons chimiques; c'est le craquage thermique, appelé également « pyrolyse ». Cette transformation chimique permet la maturation du kérogène en un mélange composé essentiellement de l'eau, du CO₂ et des hydrocarbures « molécules exclusivement composées de carbone et d'hydrogène », c'est le pétrole brut.

I.1.3 Types de pétrole

Pour distinguer des différents types de pétrole plusieurs critères existent selon le gisement d'où il est extrait c'est-à-dire l'histoire géologique de la zone où il s'est développé, toutefois Les plus importants sont les mesures de la viscosité et de la teneur en soufre du pétrole brut.

Selon la viscosité, quatre types de gisements sont définis (léger, moyen, lourd ou extra-lourd et bitume). Plus le pétrole brut est visqueux, plus il est lourd :

- **les gisements de pétrole léger** : l'aspect du pétrole brut se rapproche de celui du gas-oil. Les gisements sahariens présentent cette caractéristique.
- **les gisements de pétrole moyen** : la viscosité du pétrole brut est intermédiaire entre le pétrole léger et le pétrole lourd. Il s'agit par exemple des gisements du Moyen-Orient.
- **les gisements de pétrole lourd ou extra-lourd** : le pétrole brut ne coule pratiquement pas à température ambiante. Les gisements d'Amérique du sud en sont un exemple.
- **les gisements de bitume** : le pétrole brut est très visqueux voire solide à température ambiante. Les principales réserves de ce type se trouvent au Canada. [1]

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

Cette propriété est importante pour déterminer la rentabilité de l'exploitation. En effet, un pétrole peu visqueux ou léger est plus facile à extraire et à traiter qu'un pétrole lourd.

Selon La teneur en soufre, trois types sont distingués (% poids) :

- Teneur en soufre < 0.5% = pétrole légèrement sulfuré (doux)
- 0.5% < Teneur en soufre < 2.5% = pétrole moyennement sulfuré
- Teneur en soufre > 2.5% = extrêmement sulfuré

Une teneur en soufre élevée nécessite des efforts en raffinage supplémentaires pour atteindre les spécifications des produits.

Selon la prédominance de l'une des familles différenciées par leurs structures chimique, on distingue des bruts : Paraffiniques, Naphténiques et Asphaltiques.

I.1.4 Composition d'un pétrole brut

Les pétroles bruts sont des mélanges complexes essentiellement composés de molécules résultant de la combinaison d'atomes de carbone tétravalents et d'atomes d'hydrogène monovalents, avec d'autres éléments de tableau périodique ...etc. d'où l'appellation d'hydrocarbures.

La connaissance exacte de la composition d'un pétrole est nécessaire car elle est liée aux conditions de production, de transport de stockage et de raffinage adaptés au pétrole et aux produits pétroliers.

I.1.4 .a Les hydrocarbures purs

▪ **Les hydrocarbures paraffiniques (aliphatiques saturés)** : soit linéaire appelés les normales paraffines ou normales alcanes ou ramifiés appelés les iso-paraffines ou iso-alcanes. Leur formule générale est C_nH_{2n+2} .

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

- Les naphènes (hydrocarbures cycliques saturés) :

Dans ces cycles, chaque atome d'hydrogène peut être substitué par une chaîne paraffinique droite ou ramifiée. Leur formule générale est C_nH_{2n} .

- Les aromatiques (hydrocarbures cycliques insaturés) : sont des hydrocarbures cycliques poly insaturés, leur formule générale est C_nH_{2n-8k} .

En effet, les premiers termes (benzène, toluène, xylène) sont des matières premières fondamentales de la pétrochimie, mais en générale haut de la de C8 sont néfastes et provoquent des problèmes d'environnement, santé publique, ainsi la détérioration de l'activité des catalyseurs par leur capacité a formé le coke.

- Les hydrocarbures aliphatiques insaturés : sont les alcènes (la présence d'une ou plusieurs doubles liaisons carbone-carbone) et les alcynes (la présence d'une ou plusieurs triples liaisons carbone-carbone).

Familles	N-paraffines	Iso-paraffines	Oléfines	Naphènes	Aromatiques
Formules	C_nH_{2n+2}	C_nH_{2n+2}	C_nH_{2n}	C_nH_{2n}	C_nH_{2n-8K}
Exemples					

Tableau I.1- Structure de composés hydrocarbonés présents dans les produits pétroliers

n : nombre d'atomes de carbones.

k : nombre d'insaturations.

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

I.1.4 .b Les composés autres que les hydrocarbures

En générale la présence de ces éléments dans le pétrole brut est indésirable spécialement si elle dépasse les normes internationales.

Les Hétéroatomes

➤ Les composés sulfurés :

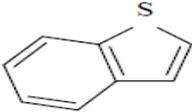
Familles	inorganiques		Organiques				
Noms	soufre	acide	oxysulfure	Sulfures (cycles)	disulfures	mercaptans	thiophène
		Sulfurique	de carbone				
Formule	S	H ₂ S	COS	R-S-R'	R-S-S-R'	C _n H _{2n+1} SH	

Tableau I.2 – Structure de composés soufrés présents dans les produits pétroliers

Inconvénients des composés sulfurés : la concentration des composés sulfurés est remarquable dans le pétrole lourd notamment avec l'augmentation de la densité et de la viscosité, parmi les inconvénients citons :

- ✓ Corrosifs dans : les tubes des échangeurs de chaleur, des fours, les pipelines...etc.
- ✓ toxiques pour les voies respiratoires et l'environnement en générale.
- ✓ formation de gommages dans les moteurs automobile.
- ✓ poisons pour les catalyseurs en diminuant leur activité.
- ✓ diminuer l'indice d'octane.

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

- **Les composés azotés** : leur concentration est élevée dans les résines et les asphaltènes rencontrés dans la fraction lourde de pétrole à un point d'ébullition supérieure à 250°C.

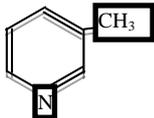
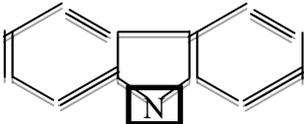
Familles	Pyridines	Amides	Amines	Carbazoles
Exemples		$\begin{array}{c} \text{---C---N} \\ \quad \diagdown \end{array}$	$\text{R-NH}_2, \text{R-NH-R}'$	

Tableau I.3 – Structure de composés azotés présents dans les produits pétroliers

- **Les composés oxygénés** : sont responsables de l'acidité des pétroles et provoquent les problèmes de corrosion

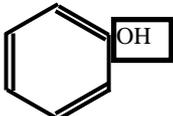
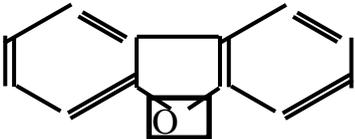
Familles	Phenols	Furanes et benzofuranes	Acides carboxyliques	Esters
Exemples			R-COOH	$\text{R-COO-R}'$

Tableau I.4 – Structure de composés oxygénés présents dans les produits pétroliers

Les composés organométalliques

Ce sont les atomes métalliques tels que le nickel et le vanadium (plus de 75% de la teneur globale en métaux) rencontré dans la fraction lourde de pétrole.

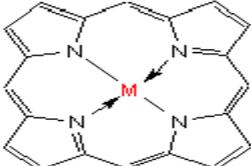
Familles	Porphyrines
Exemples	

Tableau I.5 – Structure de composés métalliques présents dans les produits pétroliers

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

Les asphaltènes

Ce sont des solides noirs brillants constitués par des feuilles poly-aromatiques condensées et reliées par des chaînes saturées, leur masse moléculaire varie entre 1000 et 100000, la présence des asphaltènes dans le brut cause certains problèmes:

- ✓ Riches en hétéroatomes qui restent indésirables pour les catalyseurs.
- ✓ La présence des fonctions polaires qui provoquent l'augmentation de la mouillabilité de la roche.
- ✓ Provoquent une grande viscosité ce qui limite la production.
- ✓ Bouchage des puits par précipitation.
- ✓ Problèmes de transport.

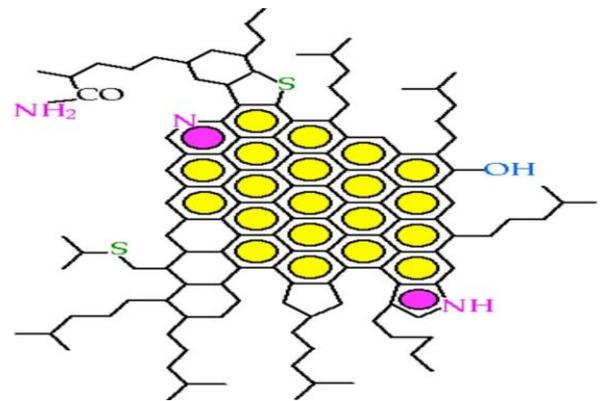


Figure I.1- les asphaltènes

Les résines

Les résines sont des molécules poly-condensées ou non, contiennent des structures aromatiques ainsi qu'une partie des hétéros éléments et des métaux. Elles diffèrent des asphaltènes par le degré d'aromatisation et le degré de polarité. La fraction résine est moins aromatique et faiblement polaire que la fraction asphaltènes. De ce fait, la frontière entre les résines et les asphaltènes est très difficile à déterminer.

Les composés accompagnés avec le pétrole brut :

Le pétrole brut est produit avec des impuretés qui seront éliminés par la suite avec un traitement dans les différents équipements.

- L'eau et les sédiments: 0,1 à 0,6 % volume
- Sels minéraux : 20 à 200 g/t

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

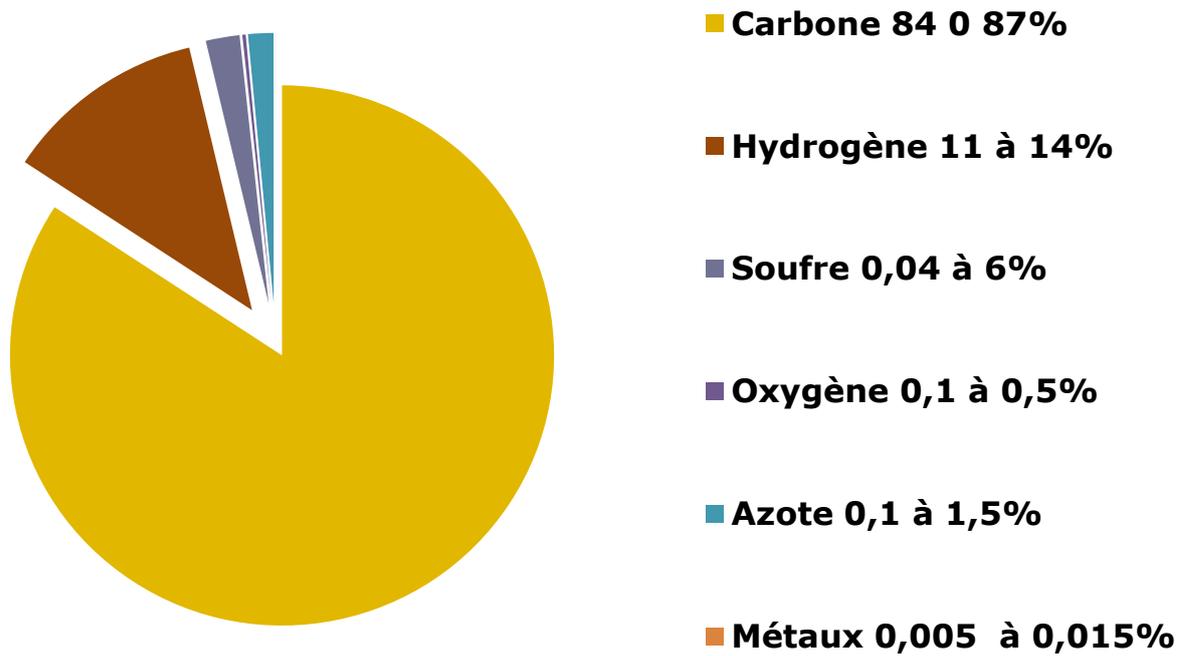
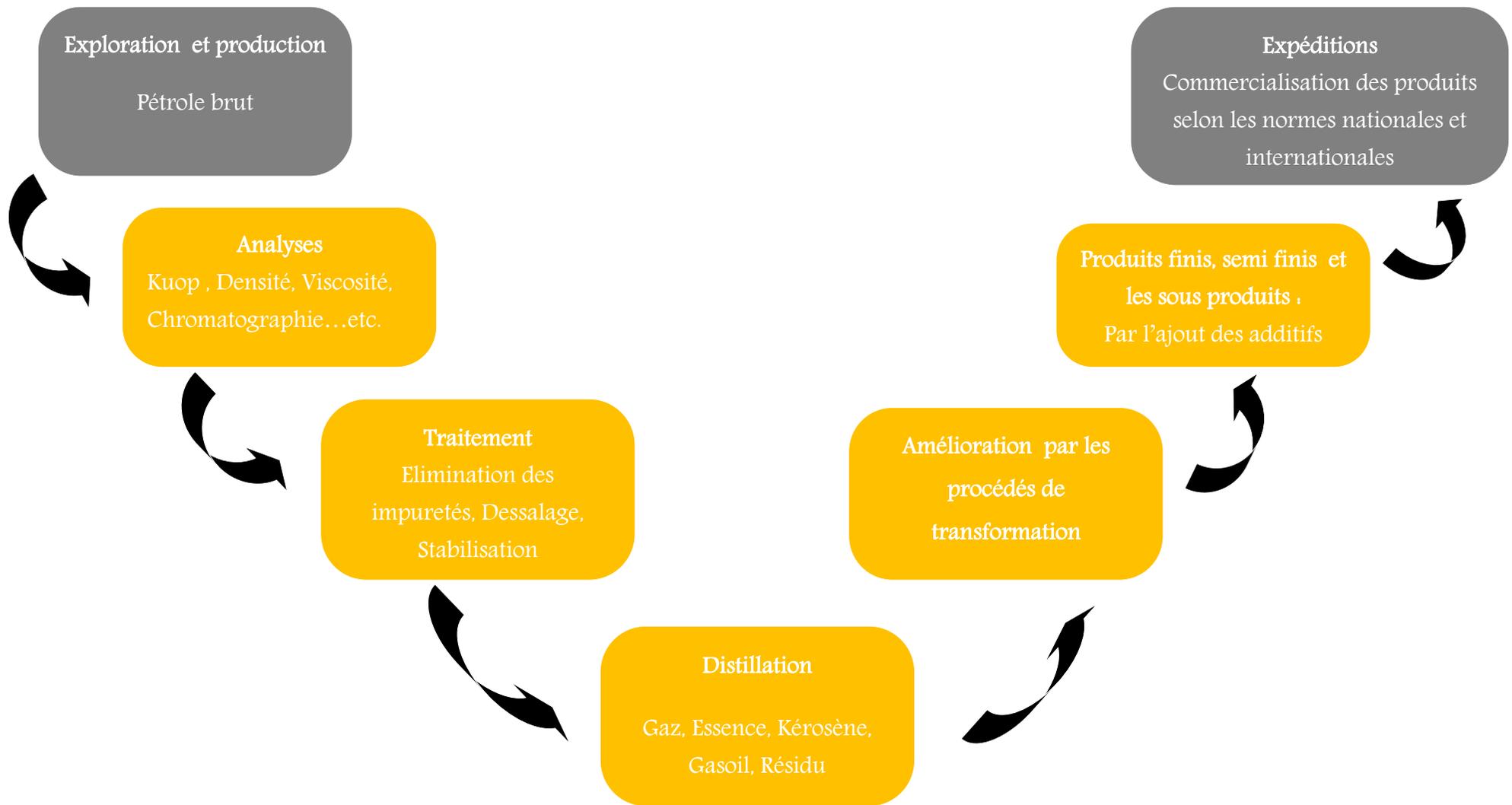


Figure I.2- la composition générale d'un pétrole brut en pourcentage massique

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

De l'exploration vers l'expédition



Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

I.2 METHODE ANALYTIQUES POUR LA CARACTERISATION DES PETROLES BRUTS ET DES COUPES PETROLIERES

La caractérisation moléculaire des pétroles bruts joue un rôle important dans l'industrie pétrolière car elle évalue l'efficacité de certains traitements et permet l'interprétation des procédés chimiques ainsi leur optimisation. Toutefois elle se repose sur des méthodes d'analyse normalisées.

propriétés physiques globales	Analyses structurales	Techniques chromatographiques	Réactions chimiques
-Densité -Viscosité et le point d'écoulement	Spectrométrie de masse pour la répartition par famille.	Chromatographie en phase gazeuse CPG.	Indice de brome IBR
Facteur de caractérisation K_{UOP} ou facteur de Watson K_w .	Spectrométrie dans l'ultraviolet Pour la répartition par famille.	Chromatographie en phase liquide HPLC	Indice d'anhydride maléique MAV
Méthode ndM	Spectrométrie par vibration dans l'infrarouge Pour la répartition selon la nature des atomes de carbone.	Chromatographie sur couche mince CCM	

Tableau I.6 – les méthodes de calcul et d'analyse pour la caractérisation des pétroles et des coupes pétrolières.

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

I.3 GENERALITES SUR LA DISTILLATION ATMOSPHERIQUE

I.3.1 Introduction aux principes de la distillation

Afin d'obtenir des coupes pétrolières de base utilisables dans plusieurs applications (secteur pétrochimique, pharmaceutique...etc) ou des composants individuels (ex : ségrégation du Propane et Butane) il a fallu très tôt dans le développement de l'industrie « Oil et Gaz » faire appel à un procédé différent de la séparation classique, ce procédé s'appelle la distillation.

La distillation est le procédé major permettant la séparation des différentes phases liquides et gazeuses du pétrole brut dans des conditions P et T fixées.

La première étape est la distillation atmosphérique dont on obtient les fractions de base : gaz, essence, kérosène, gas-oil et résidu atmosphérique RAT (qui sera valorisé par suite dans la distillation sous vide), dans la seconde étape on fractionne la coupe obtenu en tête de colonne (gaz + essence) dans une installation composé essentiellement :

- Colonne de stabilisation « débutaniseur » pour séparer l'essence du gaz.
- Déethaniseur pour séparer le gaz combustible (C_1 , C_2) et le GPL (C_3 , C_4)
- Dépropaniseur pour séparer le propane et le butane
- Splitter pour séparer l'essence légère et l'essence lourde.

I.3.2 La distillation atmosphérique

C'est le terme anglo-américain "Topping", plus connu qui est le plus souvent utilisé, la distillation atmosphérique (parce qu'elle s'effectue généralement à des pressions inférieures à 3 Bar) est la première opération que subit le brut en arrivant à la raffinerie après le traitement (dessalage) et qui permet d'avoir comme produits des distillats de base dont leurs caractéristiques seront par suite améliorer par des

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

installations de conversion ou d'épuration situé en aval dans le schéma de la raffinerie.

Il existe trois types d'installations de distillation atmosphérique :

- ✓ Installation pour le pétrole lourd
- ✓ Installation pour le pétrole moyen
- ✓ Installation pour le pétrole légère

I.3.3 Les conditions de fonctionnement de la colonne de distillation

- ✓ Notion de volatilité "la volatilité du corps": est l'une des propriétés particulières des fluides qui permet d'appliquer le procédé de Distillation
- ✓ Transfert de matière et transfert de chaleur : afin de parvenir au résultat recherché (composants en qualité et quantité), une conservation de bilan matière et bilan thermique doit être assurée « 'rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme' ».

I.3.4 Les produits pétroliers

Actuellement, les raffineries fabriquent en trois aspects



Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

Les produits obtenus à partir de la distillation atmosphérique du pétrole du haut en bas de la colonne sont :

- La tête de colonne dans laquelle on sépare le gaz du liquide (essence légère) par refroidissement.
- L'essence lourde (naphta)
- Le kérosène
- Le gazole léger
- Le gazole lourd
- Le résidu atmosphérique (fond de colonne)

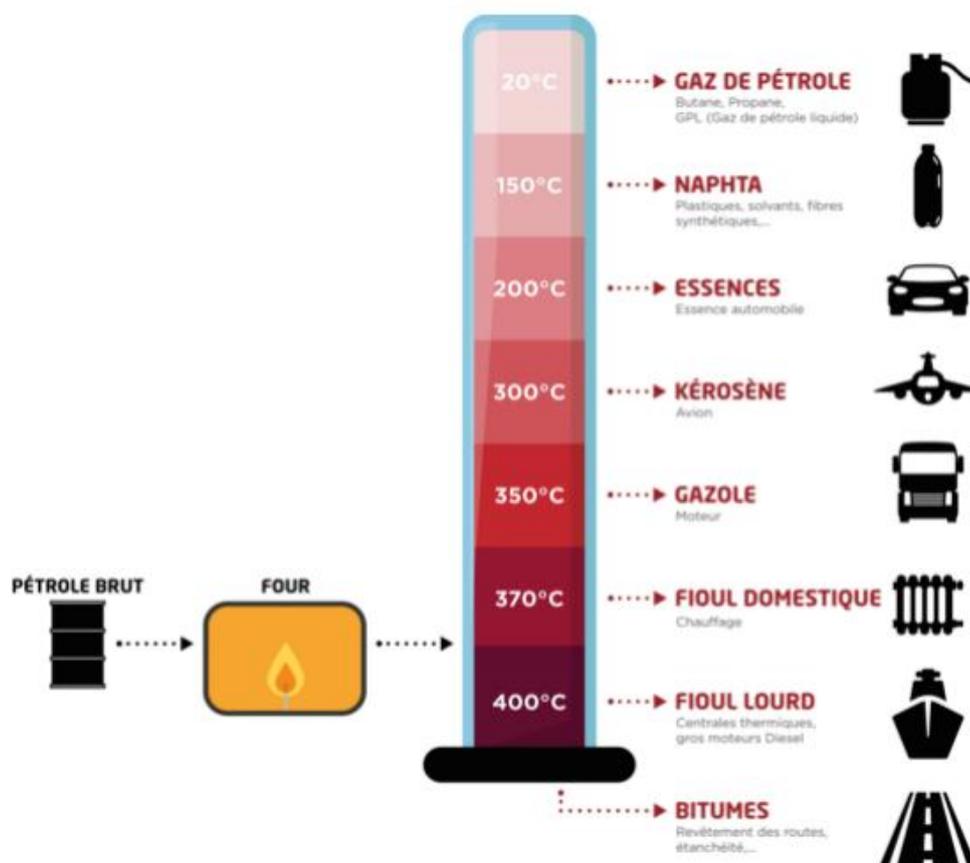


Figure I. 3- Tour de distillation atmosphérique

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

I.3.5 Le principe du fonctionnement de la colonne

La charge vaporisée partiellement est introduite dans la colonne par la zone d'alimentation à une température bien précisée, l'apport de chaleur est assurée par une batterie d'échangeurs de chaleur (les préchauffeurs ainsi le rebouilleur en bas de la colonne).

Les deux phases circulent à contre courant, les vapeurs riches en éléments légers montent à travers les clapets et le liquide riche en éléments lourds descend par les plateaux. Cette séparation utilise la chaleur comme agent de séparation.

Latéralement, Les produits soutirés sont : naphta, kérosène, gasoil (nécessitent le stripage pour régler les points de coupes).

En tête de colonne, les produits soutirés sont : le gaz et l'essence légère.

En bas de colonne le résidu atmosphérique (RAT) est soutiré.

- ✓ **Zone d'alimentation** : c'est l'entrée du mélange à fractionner.
- ✓ **Zone de rectification** : se situe au-dessus de la zone d'alimentation, son objectif est d'éliminer les produits lourds du distillat.
- ✓ **Zone d'épuisement** : se situe au-dessous de la zone d'alimentation, son objectif est d'appauvrir le résidu en produits légers.

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

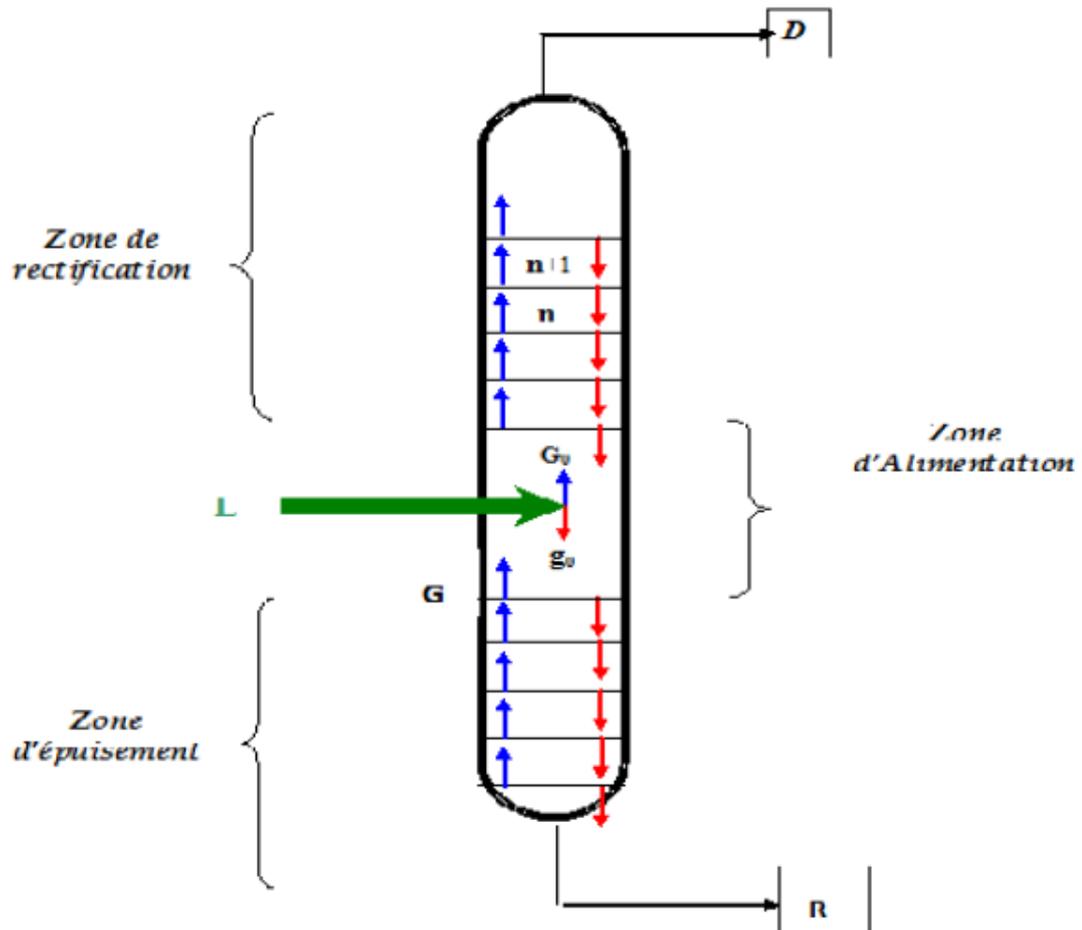


Figure I.4- Schéma général du fonctionnement d'une colonne de rectification

G_v : Vapeur montante. L : Alimentation. n : nombre du plateau
 D : Distillat. R : Résidu. g_v : Liquide descendant.

La colonne de rectification est munie toujours d'un rebouilleur et d'un condenseur partiel.

Rôle du condenseur : A l'aide du condenseur partiel on enlève au sommet de la colonne une quantité du condensat qui est renvoyé dans la colonne en qualité de « reflux froid » qui ajuste la température en tête de colonne à la valeur choisie.

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

Rôle du rebouilleur : A l'aide du rebouilleur on apporte une quantité de chaleur, et c'est dans le rebouilleur que le liquide provenant du plateau inférieur se vaporise partiellement.

La vapeur obtenue retourne dans la colonne en qualité de « **reflux chaud** » et le résidu quitte l'appareil.

I.3.6 L'équilibre liquide- vapeur

Au cours de la mise en contact de deux phases le transfert de la matière et de la chaleur s'effectue à travers l'interface et le système tend vers l'état d'équilibre.

Le graphe suivant présente la courbe de bulle et la courbe de rosée, l'axe des ordonnées présente l'échelle des températures et celui des abscisses indique la composition d'un mélange des composés légers **A** et composés lourds **B**.

Ce graphe permet d'indiquer la quantité de **A** et **B** contenues dans les phases vapeur et liquide à une température donnée.

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

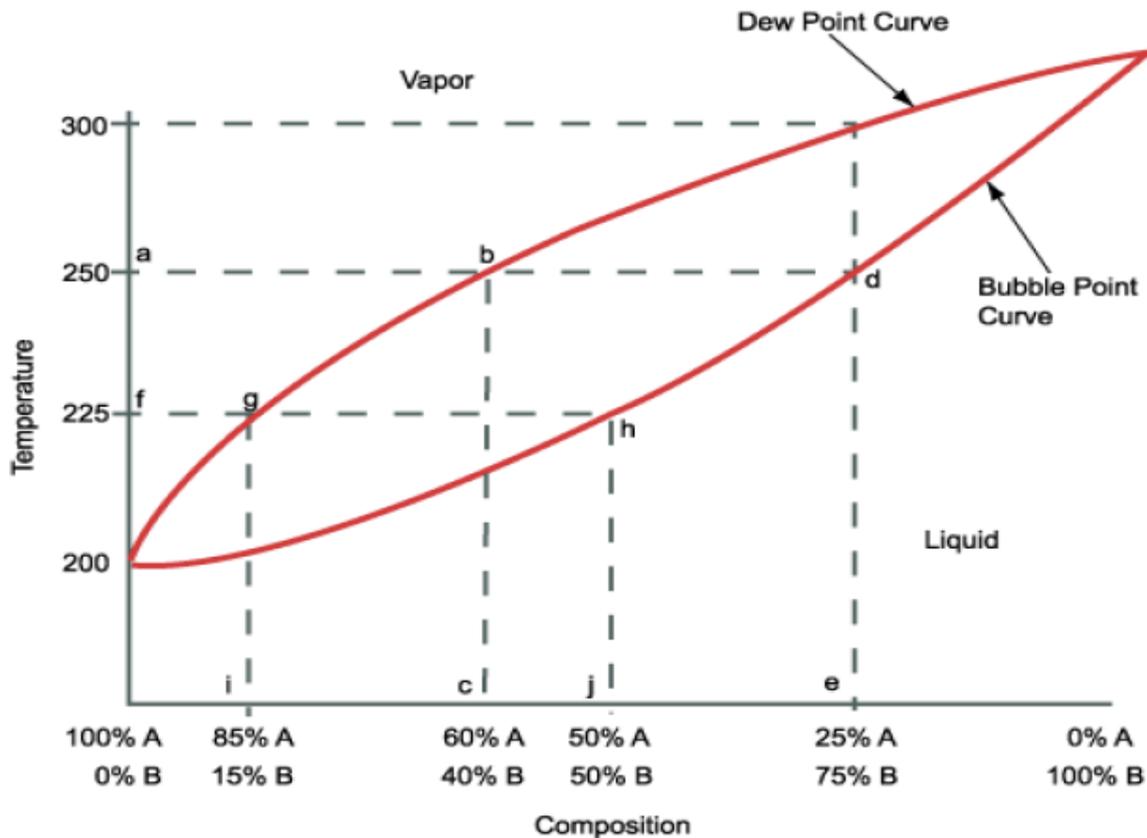


Figure I.5- Courbe de Rosée et courbe de Bulle "diagramme isobare"

I.3.6.a Les lois d'équilibre des phases liquide-vapeur

Soit X_A le titre molaire en A dans la phase **liquide** du mélange.

Soit Y_A le titre molaire en A dans la phase **vapeur** du mélange.

Soit P_A la pression de vapeur en A émise par le liquide à la température T.

Soit $P_A^\circ(T)$ la pression de vapeur saturante de A à la température du mélange à T.

Loi de Raoult: pour un mélange idéal, la pression de vapeur en A émise par le mélange est égale au produit du titre molaire en phase liquide et de la pression de vapeur saturante de A à T:

$$P_A = X_A P_A^\circ(T)$$

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

Loi de Dalton: la pression partielle en A dans la phase vapeur est égale au produit du titre molaire en phase vapeur et de la pression totale, soit:

$$P_A = Y_A P$$

Expression de la loi de Raoult-Dalton (applicable pour les faibles valeurs de pression) : $Y_A = K_A X_A$.

K_A : c'est le facteur d'équilibre des phases qui caractérise la distribution du constituant A entre les deux phases en équilibre.

Pour les pressions élevées, le facteur d'équilibre des phases K_A caractérise la distribution réel d'un constituant A entre les deux phases, il est calculé par des méthodes thermodynamiques qui reposent sur les valeurs expérimentales ou peut être obtenu à l'aide des **diagrammes de Scheybel –Jenny et Wilson- Winn**.

I.3.7 Dimensionnement d'une installation de distillation

Pendant très longtemps, le calcul des colonnes de distillation en continu s'est fait à partir de deux méthodes graphiques : "McCabe& Thiele" et "Ponchon et Savarit". [2]

Construction de McCabe et Thiele

Le graphe au dessous permet de déterminer le nombre minimum d'étages théoriques NET pour réaliser une telle séparation, par le tracer des escaliers (ou plateaux) entre la courbe d'équilibre et la bissectrice, de X_w (titre molaire des composés lourds) à X_d (titre molaire des composés légers).

Si on étudie une colonne en fonctionnement:

- efficacité des plateaux = NET / Nombre de plateaux réels
- HEPT = Hauteur de garnissage / NET, avec HEPT= Hauteur de garnissage Equivalente à un Plateau Théorique (en mètres)

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

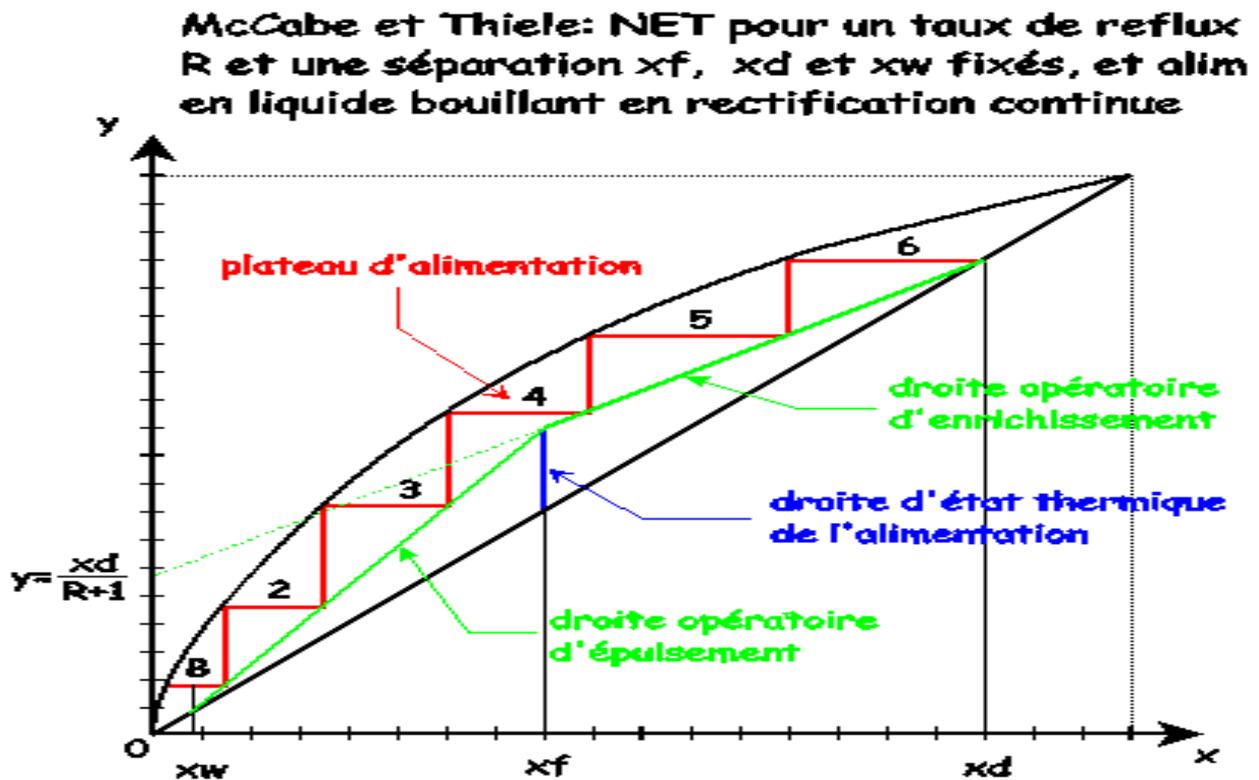


Figure I.6- Construction de McCabe et Thiele

Un tracé de la courbe d'équilibre, qui représente le comportement thermodynamique du mélange binaire (A, B) à la pression de la colonne. Les plateaux étant des lieux où, en première approximation, l'équilibre entre phases est atteint. Chaque plateau de la colonne peut être représenté par un point (ou un palier) sur cette courbe.

Le tracé de deux droites opératoires, valables chacune dans l'une des sections de la colonne (concentration et épuisement), qui relie la composition de la vapeur quittant le plateau $i+1$ à celle du liquide quittant le plateau i : les droites opératoires permettent de passer d'un plateau à l'autre de la colonne

L'avantage de l'hypothèse proposée par Mc Cabe et Thiele est de simplifier les équations de bilan par zone ; par conséquent, cette méthode n'est pas applicable quand les propriétés enthalpiques des constituants sont sensiblement peu différentes

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

I.3.8 Les paramètres de la colonne

- a) **La température de la zone de flash :** dépend de fonctionnement des échangeurs de chaleur de leur surface et de la nature de brut. Cette température est déterminée par la courbe de flash du pétrole brut construite à la pression choisie dans la zone de flash et par le taux de vaporisation nécessaire
- b) **La température de sommet de la colonne :** est la température de rosée du distillat sous une certaine pression et en générale elle est déterminée comme le point final de la courbe de flash de la fraction légère. Le refroidissement en haut est assuré par le reflux froid créé par le condenseur et l'apport de chaleur est assuré par les vapeurs montantes contenant les composants légers.
- c) **La température du fond :** est égale au point de bulle du résidu à la pression de la colonne elle est assurée par le reflux chaud créé par le rebouilleur. Le gradient de Température de haut en bas de la colonne permet la séparation de la charge. Toute perturbation de ce paramètre diminue l'efficacité de la rectification donc des produits finaux de mauvaise qualité.
- d) **La pression :** Le choix de la pression dépend d'autres paramètres opératoires ainsi quelques conditions économiques mais en générale elle est supérieur à la pression atmosphérique cela due à la perte de charge dans les appareils en aval.

Toute augmentation de la pression diminue l'efficacité de la rectification car elle diminue les volatilités relatives cela peut être est récompensé par l'augmentation de nombre de plateaux théoriques soit par l'augmentation de taux de reflux ainsi le résidu sortant ayant une température mois élevée nécessite une surface d'échange plus grande dans l'échangeur de chaleur de bas a cause d'un faible écart entre le fluide caloporteur et le résidu sortant.

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

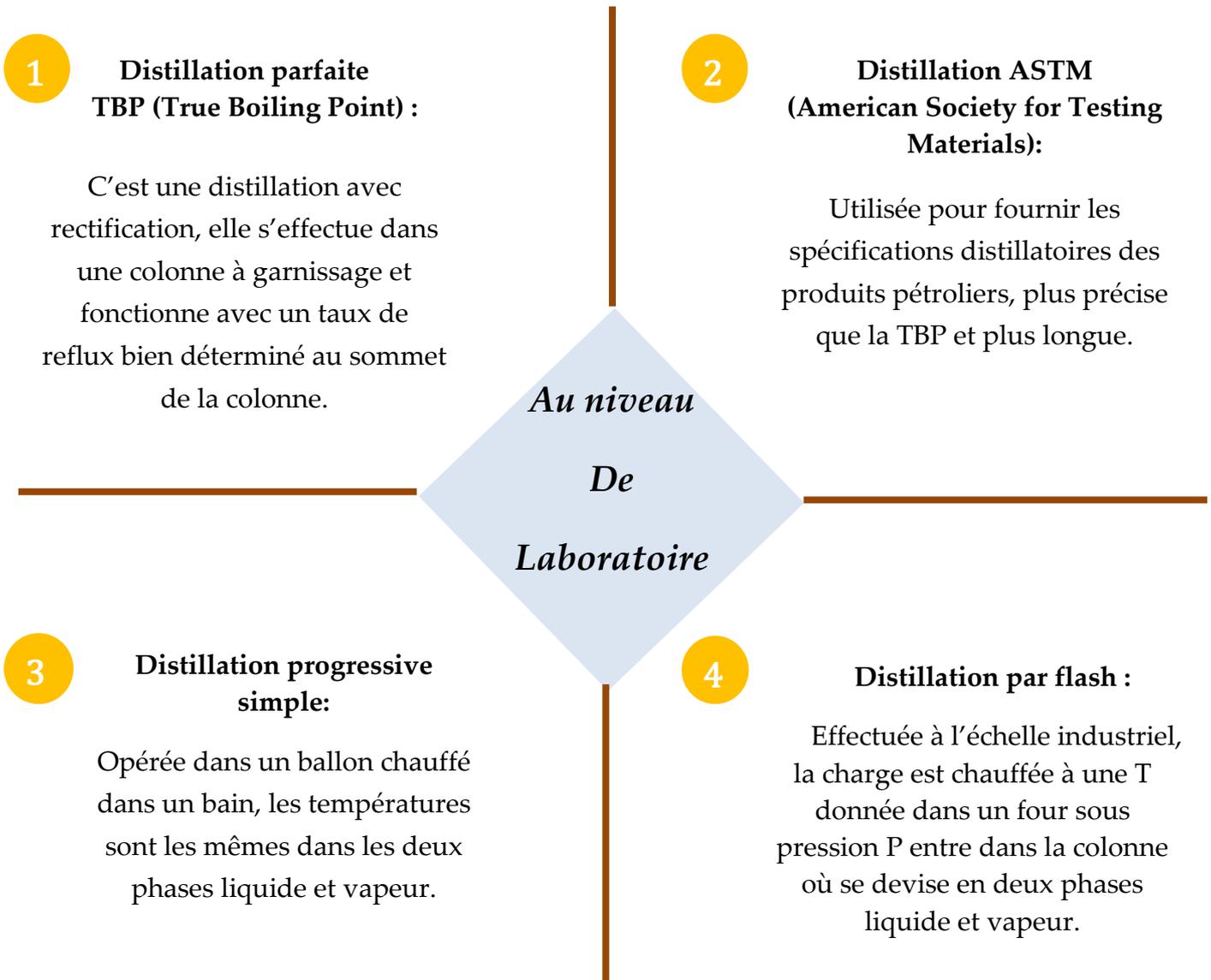
Toute perturbation de ce paramètre peut être liée au fonctionnement des équipements thermique (condenseur et rebouilleur), les régulateurs de pression ou les pertes des charges.

- e) **Débit d'alimentation et le taux de vaporisation** : doit être maintenu constant dans la mesure du possible.

Tout changement des caractéristiques de la charge influe sur l'opération de la séparation.

- f) **Reflux** : Le débit de reflux est une grandeur importante qui intervient dans la détermination des droites opératoires de concentration (McCabe et Thiele) et du pôle opératoire (Ponchon et Savarit) et donc dans du nombre d'étage théorique (NET), ainsi que dans le calcul des chaleurs échangées de la colonne (QC et QB).[2]

I.3.9 Types de distillation au laboratoire



I.4 GENERALITES SUR LE CONDENSAT

I.4.1 Origine de condensat

Les produits pétroliers et gazeux sortent souvent des gisements sous forme de mélange liquide. Ces hydrocarbures sont collectés par des conduites et évacués vers

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

un centre de traitement. La séparation du gaz est obtenue essentiellement par détente. Après le traitement on distingue deux types de gaz qui impliquent deux traitements différents.

- Gaz humide : Il est riche en fractions condensables. Dans ce cas le traitement va combiner les techniques de séparation par détente et le fractionnement par distillation. Grâce à une série de détentes, on obtient un refroidissement du gaz jusqu'à moins 60° ce qui va permettre une récupération maximale d'hydrocarbures liquides tel que : les GPL et les condensats.
- Gaz sec : Celui-ci se trouve pauvre en fractions condensables. Il est essentiellement constitué de méthane. Le traitement va donc consister à éliminer les éventuelles impuretés.

I.4.2 Usages du condensat

Le condensât est assimilé à un pétrole brut léger. Il peut être utilisé comme charge de raffinage pour l'obtention des coupes pétrolières désirées, et comme matière première de la pétrochimie pour l'obtention de l'éthylène. Il est à noter qu'il peut aussi être utilisé comme constituant d'un brut « blending », quand les conditions le permettent.

I.4.2.a Utilisation en raffinage

Dans le raffinage, le condensât peut suivre une des deux alternatives suivantes :

- **La distillation**

Elle permet d'obtenir une gamme de produits légers, moyens et lourds. Les plus légers montent vers le haut de la colonne de distillation, tandis que les plus lourds se déposent en bas de la colonne. On obtient ainsi dans la colonne du haut en bas : GPL, naphtha, gasoil, fuel.

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

- **Le blending**

Dans le blending le condensât a deux utilisations : soit alléger un pétrole brut lourd, soit reconstituer un pétrole brut.

- Dans le 1^{er} cas : le mélange de condensât avec un brut lourd entraînera la formulation d'un brut léger.
- Dans le 2^{ème} cas : le condensât mélangé avec résidu lourd tel le fuel permet l'obtention d'un brut reconstitué, autrement dit : brut synthétique.

I.4.3 Le condensat Algérien

I.4.3.a Qualité de condensât Algérien

Le condensât algérien se présente comme un mélange d'hydrocarbures dont le point final de distillation est voisin de 300°C. On peut donc le considérer comme un pétrole brut très léger (densité $\approx 0,720$), paraffiniques. Sa teneur en soufre est très basse, 40 à 50 fois moins sulfuré que le mélange Saharien, et son acidité est nulle.

Vu la bonne qualité de ce condensât, il constitue pour le raffineur un mélange d'excellente qualité et n'exige aucun prétraitement particulier. Un traitement classique de séparation par distillation permet l'obtention de : GPL, des essences, naphtha, kérosène, gasoil et fuel, de très bonnes qualités. Il peut être utilisé comme charge directe de vapocraquage, dont 53,9% du condensât algérien est utilisé pour le vapocraquage. Il peut être aussi mélangé aux bruts pour améliorer son rendement en naphtha.

Le condensât algérien grâce à ses caractéristiques de haute qualité paraffinique peut être utilisé comme matière première en pétrochimie, mais le seul inconvénient est qu'il nécessite un perfectionnement avant l'utilisation comme matière première pour les crackers.

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

Le condensât algérien se distingue en deux qualités :

- Le condensât d'Arzew (HR720) provenant de Hassi R'Mel, qui a une teneur élevée en paraffine, avec présence de mercure. Il présente une bonne charge pétrochimique.
- Le condensât de Bejaia (AR720) provenant d'Alrar, Rhourde Nousse et Hamra, est un condensât coloré (présence des iso paraffines), car il est altéré par des traces de brut (le développement des champs au sud de Hassi R'Mel, a imposé l'évacuation du condensât vers Bejaia à travers l'OB1). Ce condensât est moins apprécié par les pétrochimistes.

Les paramètres physico-chimiques du condensât algérien sont :

Caractéristiques	Résultats
Densité à 20°C	0.7045
Densité à 15 °C	0.7041
°API	69.3
Viscosité cinématique en cSt à 20°C/68°F 37.8°C/100°F	0.6280 0.5350
Tension de vapeur Reid à 37.8 °C Kg/cm ² Psi	0.734 10.48
Teneur en eau et sédiments, BSW, °° vol	Nulle
Teneur en soufre, ppm	<20
Point d'éclaire, vase fermé, °C	<0
Point de trouble, °C	-81.0
Indice d'acidité, mg KOH/g	0.0202
Teneur en métaux Ni/ Pb / V ,ppm	0
Couleur ASTM	0.5 L
Corrosion à la lame de cuivre 3 heure à 50°C	Négatif
Facteur de caractérisation, Kuop	12.31
Poids moléculaire, g/mol	99

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

Pouvoir calorifique supérieur, Kcal/Kg	>11200
Teneur en carbone (PNA) :	
°/° C_N	10.86
°/° C_P	20.47
°/° C_A	68.67

Tableau I.7 – les paramètres du condensat algérien

En général, le condensât algérien est un produit hautement paraffinique utilisé comme charge, en pétrochimie pour la fabrication de l'éthylène et le propylène (la base du caoutchouc) et en raffinage pour la fabrication des essences.

I.4.3.b Production du condensat algérien

Le condensat est produit généralement dans des gisements de gaz et de petites quantités dans des gisements de pétrole brut.

Les principaux champs de production qui alimentent la raffinerie de Condensat de Skikda sont :

- Alrar (795667 TM) ;
- Stockage intermédiaire Ohanet TRC
- Ohanet BHP (762838 TM)
- Tiguentourine (972317 TM)
- TFTgroupement (762881 TM)
- Rhourd Ennous (999353 TM)
- Hamra (636406 TM)

Leurs productions convergent vers la station de pompage de HEH (Haoud El Hamra) qui alimente les terminaux de Bejaia et de Skikda.

L'évolution des exploitations algériennes de condensat est comme suit :

- 1970 le condensat était injecté dans le brut

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

- 1971 la première exploitation était de l'ordre de 17.1 millions de tonnes par an.
- 1999 la production de condensat atteint 17.3 millions de tonnes.
- 2000 la production de condensat atteint 17.7 millions de tonnes.

I.5 LES NORMES

La normalisation ou la standardisation a pour objet de fournir des documents de référence comportant des solutions à des problèmes techniques et commerciaux concernant les produits et donne également les caractéristiques d'un matériel ou d'un produit. C'est le résultat d'un consensus entre les producteurs et les consommateurs en premier lieu et ensuite d'un accord avec l'administration.

Deux types de normes

- Normes de classifications et de caractéristiques : équivalentes aux spécifications mais non contrôlées par l'administration publique.
- Normes de tests et de méthodes d'essais : cités dans les caractéristiques, elles permettent, en suivant exactement le même protocole opératoire, de vérifier les données fournies par le producteur.

Les organismes

- Organismes officiels : ISO, AFNOR (France), DIN (Allemagne), ANSI (E.U.), BSI (G.B.). Totalemment centralisé dans certain pays (France, Allemagne), plus décentralisée dans d'autres (E.U.).
- Organismes professionnelles : GFC (France), ASTM, A.P.I (E.U.)

Généralités sur le pétrole brut, le condensat et le raffinage

Chapitre II

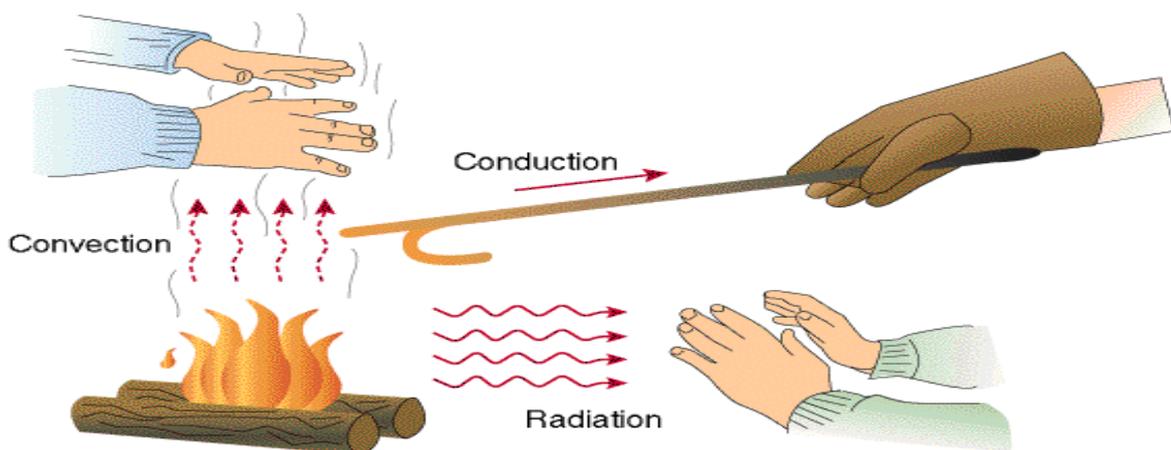
1. Introduction
2. Les équipements thermiques
3. Les échangeurs de chaleurs
4. Les fours
5. Les préchauffages d'air
6. Les fours de Topping Condensat de Skikda
7. Sécurité des fours pétroliers

Généralités sur les fours

II.1 Introduction

Avec contact ou à distance, tout corps échange de l'énergie sous forme thermique, cependant, il existe trois modes de transfert thermique *conduction*, *convection* et *rayonnement*. Bien que les trois processus puissent avoir lieu simultanément, l'un des mécanismes est généralement prépondérant.

- La conduction : c'est de transfert de chaleur sans transfert de matière, entre deux régions d'un même lieu ou entre deux milieux en contact présentant un gradient de température
- La convection : c'est le transfert de chaleur avec déplacement de molécules (transfert de matière), qui se produit dans les fluides ou à l'interface entre deux phases (fluide - solide)
- Le rayonnement : c'est le transfert de chaleur par des rayonnements électromagnétiques qui résultent de la température d'un corps.



Généralités sur les fours

II.2 Les équipements thermiques

Le fonctionnement des unités industrielles nécessite de porter les charges correspondantes à des conditions opératoires convenables, telles que la pression et la température. En ce qui concerne la température, elle est en général portée à des valeurs différentes de la température ambiante, le plus souvent par élévation. Ces niveaux de températures sont réalisés par deux types d'équipements :

- les échangeurs de chaleur : pour la récupération optimale de l'énergie thermique contenue dans les divers flux de fluides.
- les fours : qui produisent la majorité de l'énergie requise par les diverses opérations.

II.2.1 Les échangeurs de chaleur

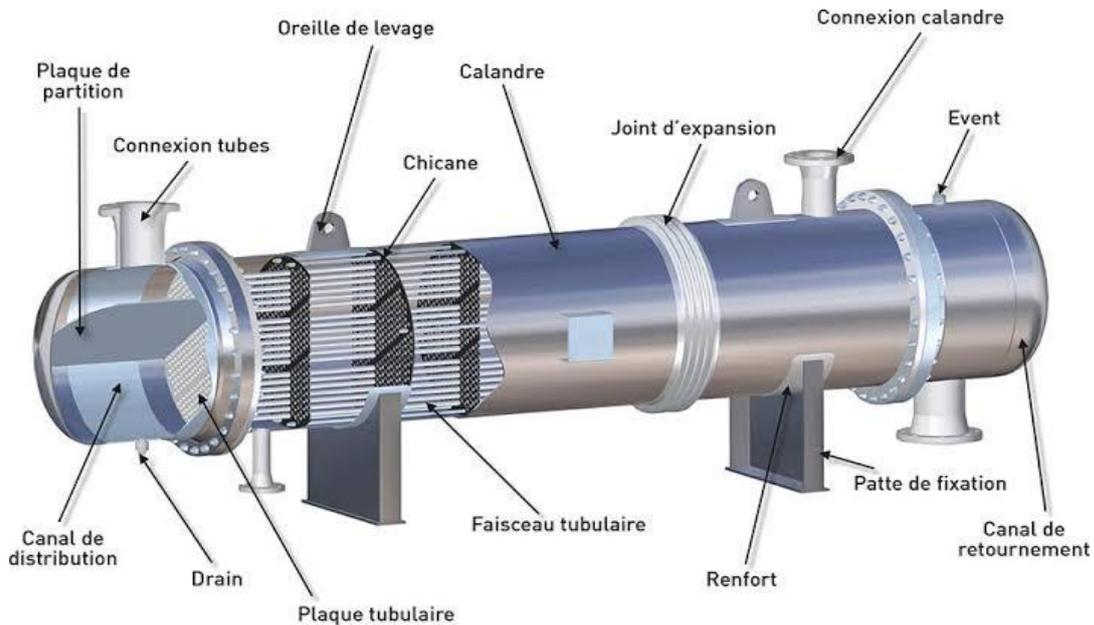
Ce sont des permettant d'abaisser, de relever la température d'un fluide, ou de modifier son état physique, ils peuvent avoir différentes fonctions dans une installation et avoir d'autres noms telle que : condenseurs, préchauffeur, rebouilleur, aéroréfrigérants...etc.

II.2.1.a Les échangeurs tubulaires

Le principe de ce type d'échangeurs est; l'un des fluides circule dans un faisceau de tubes monté sur deux plaques tubulaires. Ce faisceau est logé dans une calandre munie de tubulures d'entrées et de sortie pour le fluide circulant à l'extérieur des tubes du faisceau. Ce fluide suit un trajet imposé entre les chicanes. Celles-ci ont pour rôle entre autres de supporter les tubes du faisceau afin d'éviter leurs déformation. [3]

Il existe différents types d'échangeurs tubulaires tels que : échangeurs tube en U, échangeurs coaxial, échangeurs à tête flottante...etc.

Généralités sur les fours



La figure II.1: les éléments composants un échangeur tubulaire.

II.2.1.b Les échangeurs à plaques

Un échangeur à plaques est constitué d'un ensemble de plaques métalliques embouties au travers desquelles s'effectue le transfert de chaleur entre deux fluides. Les fluides circulent alternativement entre les plaques. Grâce aux corrugations l'écoulement est souvent turbulent même à faible vitesse, générant ainsi des coefficients d'échange très élevés (total). [3]

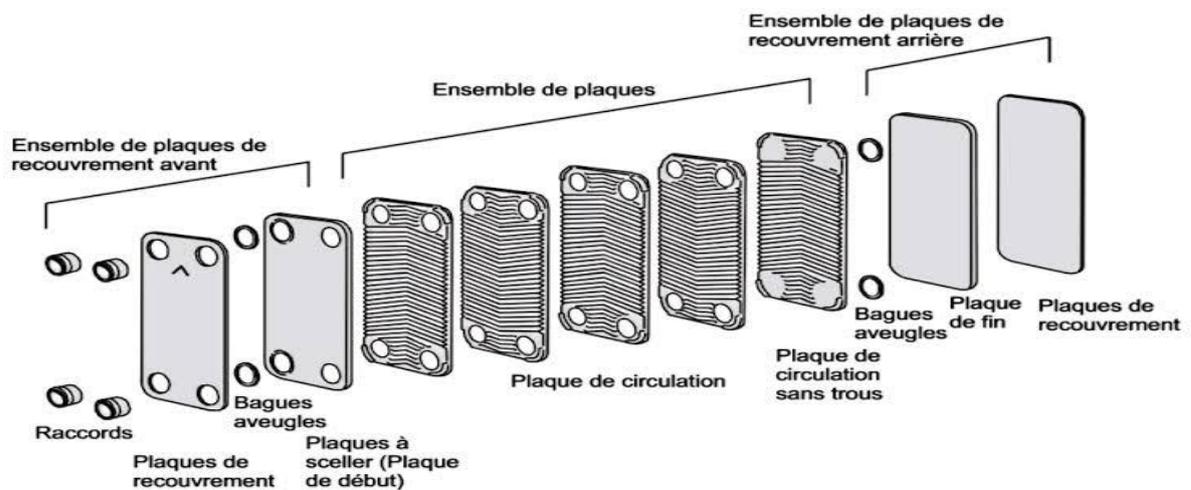


Figure II.2 : Les éléments composants un échangeur à plaque.

Généralités sur les fours

II.2.2 Les fours

Les fours sont des équipements vital pour tout site industriel, ils sont considérés comme le cœur des unités de raffinage ou de pétrochimie, dont, l'apport d'énergie thermique requise par le procédé se fait par l'intermédiaire de fours à chauffage direct dans lesquels l'énergie produite par la combustion est transmise directement au fluide à réchauffer qui circule dans un serpentin tubulaire ou un faisceau de tubes.

Selon l'effet de l'apport de chaleur au fluide de procédé on peut distinguer :

- Les fours de réchauffage de fluide sans changement d'état physique
- Les fours de réchauffage de liquide avec vaporisation partielle
- Les fours de réchauffage de fluide avec réaction chimique [4]

II.2.2.a Différents types de fours

Les fours sont généralement classés selon leur forme géométrique extérieure. On distingue les fours cabines à tubes horizontaux ou verticaux et les fours cylindriques à tubes verticaux.

Fours cabines à tubes horizontaux

La zone de radiation de ces fours est de forme parallélépipédique dont la plus grande longueur est horizontale, les tubes sont placés horizontalement le long des parois latérales les plus longues. En général, les brûleurs sont situés sur la sole.

Ce type de four se distingue essentiellement par l'existence d'un plan de symétrie permettant d'installer un grand nombre de brûleurs sur la sole. Ces derniers réalisent un véritable rideau de flammes dans le plan médian de la zone de radiation. La largeur de la zone de radiation est d'environ 6 m et la hauteur de 10 à 15 m. La longueur du four dépend de la puissance thermique par le nombre de brûleurs qu'il est nécessaire d'installer, elle peut atteindre 40 m. Dans certains cas, pour limiter la longueur du four, la zone de radiation est découpée en deux cellules disposées parallèlement et surmontées d'une zone de convection commune.

Généralités sur les fours

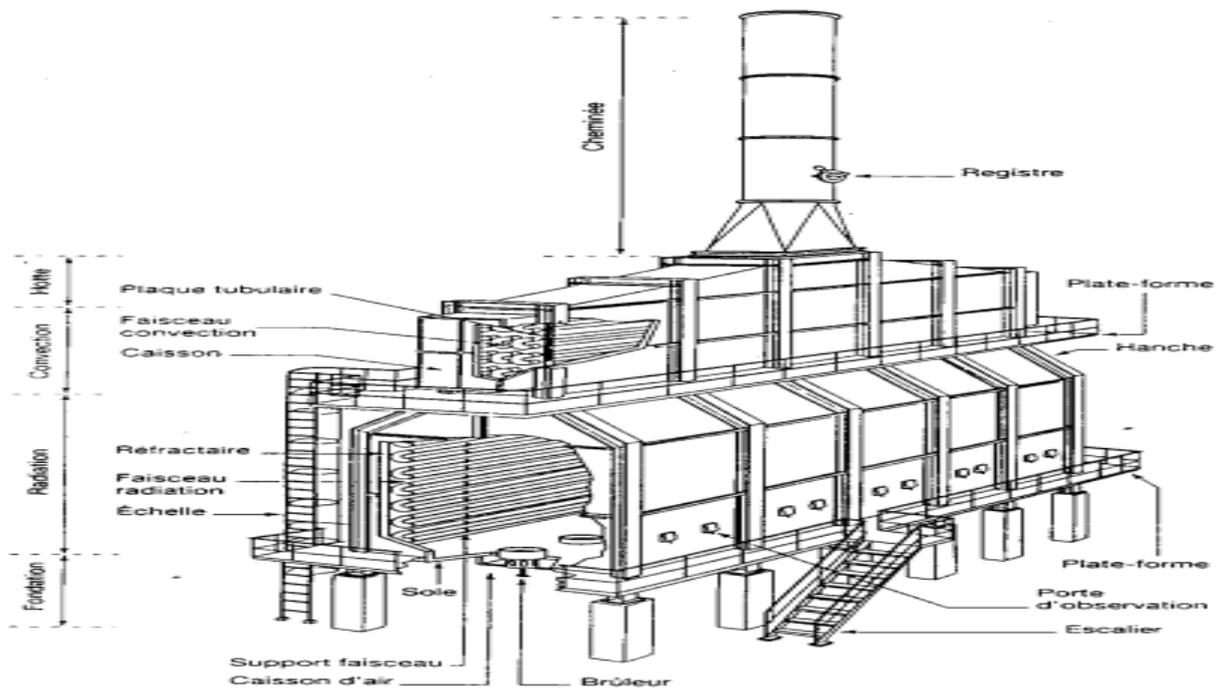


Figure II.3 : Four cabine à tubes horizontaux

Fours cabines à tubes verticaux

La zone de radiation de ces fours est de forme parallélépipédique. Les tubes sont placés circonférentiellement le long de la paroi intérieure. Les brûleurs sont situés sur la sole.

Fours cylindriques verticaux

La zone de radiation de ces fours se présente sous la forme d'un cylindre à axe de symétrie vertical. Les brûleurs sont situés sur la sole. Pour un four équipé d'un seul brûleur, celui-ci est situé au centre de la sole. Si plusieurs brûleurs sont nécessaires, ceux-ci sont disposés sur un cercle centré sur l'axe du four. Selon la puissance thermique du four les dimensions des zones de radiation varient entre 1,5 m et 13 m de diamètre avec des hauteurs allant de 2,5 m à 25 m.

Généralités sur les fours

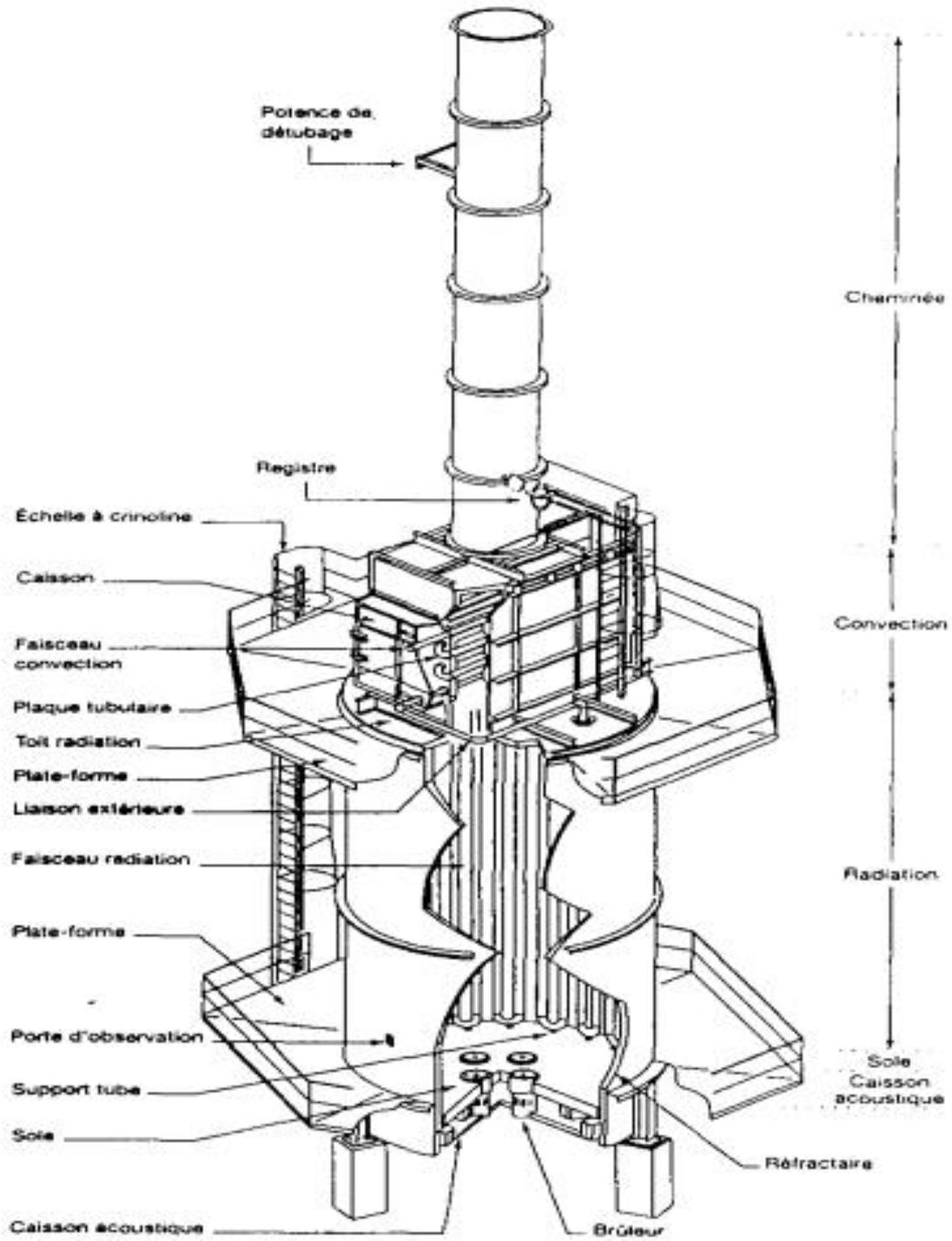


Figure II.4 : Four cylindrique vertical

Généralités sur les fours

II.2.2.b Technologie des fours

Description d'un four classique

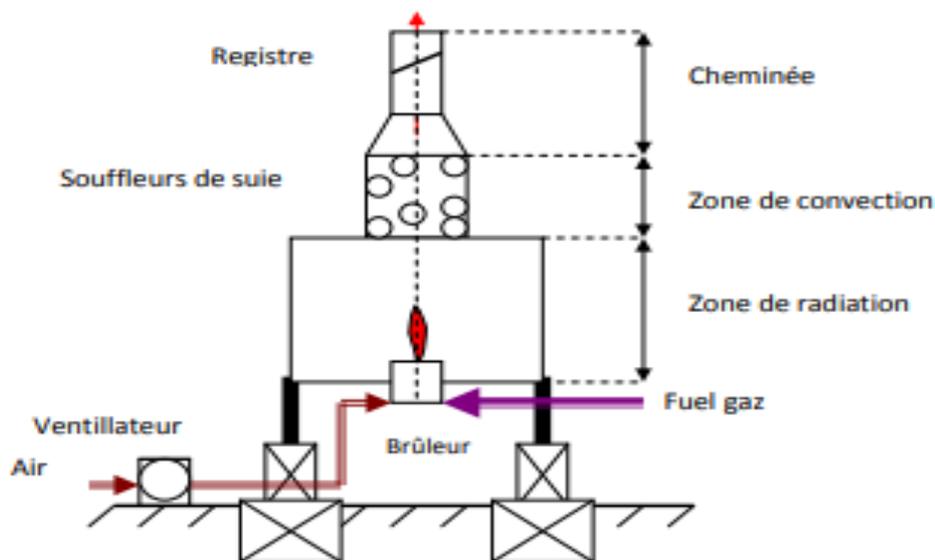


Figure II.5 : Schéma simplifié d'un four classique

Rôle d'un four

Le rôle d'un four pétrolier est d'apporter la chaleur nécessaire, soit seul, soit en complément à un train d'échangeurs, pour réchauffer un fluide ou produire une réaction en le portant à des niveaux de température élevés dans les meilleures conditions de rendement et de sécurité.

Les échanges thermiques à l'intérieur d'un four font intervenir les trois mécanismes de transfert de chaleur : la radiation, la convection et la conduction.

- Les produits de la combustion cèdent leur chaleur aux tubes par radiation et convection.
- A travers les parois de tubes, le transfert se fait par conduction.
- A l'intérieur des tubes, c'est la convection qui intervient de nouveau.
- Les pertes calorifiques à travers la virole du four se font par conduction.

Généralités sur les fours

Il est important de signaler que le phénomène le plus important à prendre en considération dans les fours est la radiation des produits de combustion.

Domaines d'utilisation des fours

Les usages des fours sont multiples, mais chaque cas nécessite une étude particulière dans le but de concevoir le four le plus économique et le mieux adapté aux conditions imposées. On cite les exemples suivants :

➤ *Réchauffage d'un fluide sans changement de phase*

Les fours de réchauffage intermédiaire d'un fluide, au cours d'une réaction chimique sur catalyseur entre les divers stades de la réaction, pour remonter la température du produit à un niveau convenable lorsque l'endothermicité de la réaction est importante (reforming catalytique...etc).

➤ *Réchauffage d'un fluide avec vaporisation partielle*

Les fours des colonnes de distillation (charge ou rebouillage) sont les plus nombreux et sont, en général, ceux dont la capacité thermique est la plus élevée.

➤ *Réchauffage d'un fluide avec réaction chimique*

Les fours de charge des unités de craquage où le produit est réchauffé jusqu'à la température de réaction.

Eléments constitutifs d'un four

Un four classique comprend :

- Une zone de radiation ou de rayonnement constituant la chambre de combustion ou foyer,
- Une zone de convection,
- Un équipement de chauffe situé à la base ou sur les côtés de la chambre de combustion et doté d'un appareillage de contrôle et de sécurité,

Généralités sur les fours

- Un faisceau tubulaire en zone de radiation et éventuellement en zone de convection,
- Une charpente métallique dotée à l'intérieur d'un garnissage réfractaire,
- Un préchauffeur d'air,
- Une cheminée,
- Des ventilateurs d'air,
- Des accessoires tels que les souffleurs de suie, les portes d'accès, les portes d'explosion, les regards, les thermocouples, les analyseurs d'oxygène et les connexions diverses nécessaires à la bonne marche du four.

a. Zone de radiation : Elle est garnie intérieurement de matériau réfractaire isolant. Les tubes, situés dans cette zone, sont exposés à la flamme et reçoivent la chaleur principalement par rayonnement des gaz brûlés. La température des fumées à la sortie de la zone de radiation est élevée (700 à 1100 °C), par conséquent le rendement est faible.

b. Zone de convection : Installée à la sortie des fumées de la chambre de combustion, elle est constituée d'un faisceau de tubes placés parallèlement ou perpendiculairement à la direction des fumées. Dans les deux cas, on cherche à obtenir une vitesse assez grande pour les fumées, de façon à augmenter le coefficient d'échange. Ces tubes peuvent être garnis d'ailettes, afin d'augmenter la surface d'échange. Le rendement d'un four muni d'une zone de convection est supérieur à celui d'un four ne comportant qu'une zone de radiation.

c. Brûleurs : Ils ont pour rôle de réaliser le mélange intime de l'air et du combustible en vue d'obtenir une combustion complète. L'air de combustion est introduit par des volets du fait de la dépression qui règne dans le four. Le combustible, gaz ou huile, débouche dans le courant d'air au centre d'un ouvrage réfractaire qui, par la chaleur qu'il rayonne, assure la stabilité de la flamme.

Généralités sur les fours

d. Faisceau tubulaire : Il est constitué de tubes en acier parallèles reliés entre eux, soit par des coudes à 180° soudés, soit par des boîtes de retour soudées ou mandrinées aux tubes. En zone de radiation, les tubes sont lisses tandis qu'en zone de convection, ils sont munis d'ailettes extérieures pour améliorer le transfert de chaleur. En général, la surface externe est multipliée par 2,5 à 4 par rapport à celle du tube nu. Dans le cas de tubes studdés, cela s'accompagne d'une multiplication de la masse des tubes par 2 à 2,6. L'utilisation d'ailettes est réservée aux fours brûlant un combustible gazeux, car les dépôts de suie produits par la combustion d'un combustible liquide sont difficilement éliminés qu'avec les studs.

e. Charpente métallique : Elle doit être suffisamment renforcée pour résister aux actions du vent et supporter le faisceau tubulaire. Comme, en général, la chambre de combustion est en dépression du fait du tirage de la cheminée, cette enveloppe doit être suffisamment étanche pour éviter l'entrée d'air parasite préjudiciable pour le rendement du four. La paroi interne de l'enveloppe, particulièrement celles de la chambre de combustion, est protégée contre l'effet de la température par un garnissage réfractaire isolant afin de réduire les pertes thermiques vers l'extérieur.

f. Garnissage réfractaire : La virole est constituée d'une paroi métallique revêtue intérieurement d'un garnissage réfractaire isolant. La température de la paroi en zone de convection ne doit pas excéder 82°C et celle en zone de radiation ne doit pas excéder 91°C pour une température ambiante de 27°C et sans vent.

Les caractéristiques essentielles d'un garnissage réfractaire sont :

- ✓ Une conductivité thermique faible,
- ✓ Une résistance mécanique élevée,
- ✓ Une bonne résistance aux variations de température,
- ✓ Une facilité de mise en œuvre.

Généralités sur les fours

Lorsque la température de la chambre de combustion est très élevée, le garnissage réfractaire est constitué de plusieurs couches. Une couche d'isolant (laine de verre ou de roche), permettant de réduire les pertes calorifiques, est interposée entre la dernière couche de briques et la charpente métallique.

Dans le cas d'un garnissage en briques réfractaires, au moins 15 % d'entre elles sont ancrées sur le casing par des crochets métalliques en acier austénitique soudés sur la paroi. Pour éviter des charges excessives sur les briques inférieures, des fers plats soudés au casing ou des rondins passant au travers de trous prévus dans les briques renvoient les efforts verticaux sur la charpente métallique.

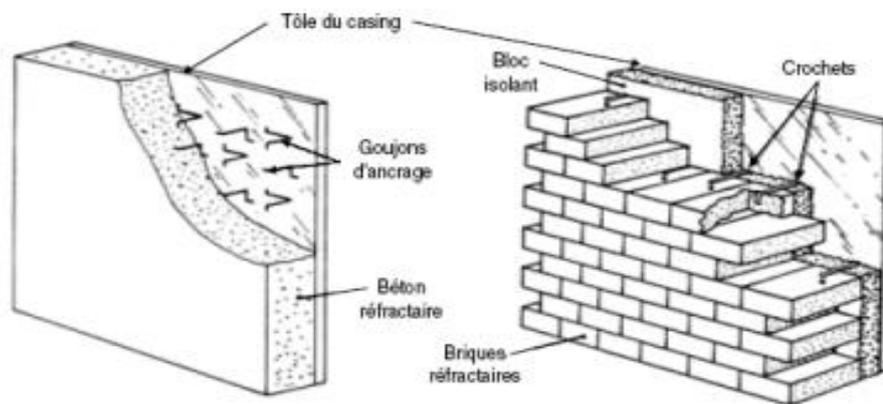


Figure II.6 : Exemples d'ancrage au casing de béton et briques réfractaires.

g. Cheminée : La cheminée, de forme cylindrique, peut être située directement sur le four ou sur une fondation séparée. Le conduit amenant les fumées à la base de la cheminée s'appelle carneau. Le rôle de la cheminée est :

- ✓ de conduire les fumées dans l'atmosphère à une hauteur telles qu'elles ne risquent pas de gêner le voisinage (ceci est important, en particulier dans les installations très resserrées où les cheminées des fours doivent être plus élevées que les colonnes voisines).

Généralités sur les fours

- ✓ de mettre, par son tirage, la chambre de combustion en dépression en provoquant ainsi l'entrée de l'air nécessaire à la combustion par les volets d'air des brûleurs.

h. Ramoneurs : Appelés aussi souffleurs de suie, ils ont pour but d'éliminer la suie qui se dépose sur la surface extérieure des tubes de convection afin de ne pas limiter les échanges thermiques et de ne pas accroître les pertes de charge sur le circuit d'évacuation des fumées. Pour conserver le rendement de la récupération de chaleur sur les fumées, il est nécessaire d'entretenir l'état de propreté des surfaces d'échange.

La mise en place de surfaces étendues (ailettes ou picots) rend possible l'accumulation de suies lorsque le combustible est liquide. L'élimination des suies se fait par ramonage systématique selon une périodicité étudiée. C'est une opération curative.

Le ramonage est effectué par l'injection de la vapeur surchauffée dans la zone de convection du four. La vapeur décolle les suies des tubes et les entraîne vers la cheminée.

II.2.2.c Caractéristiques des fours

- **La capacité** : c'est le débit molaire, massique ou volumique de la charge traitée par le four en kg/h ou T/h.
- **La charge (puissance) thermique** : c'est la quantité de chaleur produite par le four en Watt ou J/s.
- **Le rendement (l'efficacité)** : c'est le rapport entre la quantité de chaleur reçue par le four et celle qui est produite.

II.2.2.d La combustion dans les fours pétroliers

La combustion est une réaction chimique entre un combustible et un comburant. Cette réaction se fait avec une vitesse élevée et un dégagement de chaleur, elle est

Généralités sur les fours

donc exothermique. La combustion dans les fours ne peut avoir lieu que si les trois éléments suivants sont présents simultanément :

- ✓ un comburant (l'oxygène),
- ✓ un carburant (le combustible gazeux ou liquide),
- ✓ une source d'inflammation (la flamme).

Réactions de combustion

Le tableau ci-dessous représente les types de réactions résultants lors de la combustion d'un combustible.

Eléments	Réactions	Chaleur dégagée (kcal/kmole)	
		Eau vapeur	Eau liquide
Carbone	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	97 600	--
Carbone	$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$	29 400	--
Soufre	$S_2 + 2O_2 \rightarrow 2SO_2$	138 600	--
Soufre	$S_2 + 3O_2 \rightarrow 2SO_3$	183 600	--
Hydrogène	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	58 200	69 100
Méthane	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	192 500	214 300
Ethane	$C_2H_6 + \frac{7}{2} O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$	340 900	373 600
Propane	$C_3H_8 + 5 O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$	485 100	528 700
Butane	$C_4H_{10} + \frac{13}{2} O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O$	625 700	680 200

Tableau II.1 : les réactions de la combustion

Réactifs et produits de combustion

Dans les réactions de combustion, on distingue les réactifs appelés combustibles ou carburants (carbone, soufre, hydrocarbures) qui subissent la réaction et l'agent de combustion appelé comburant (l'oxygène ou généralement l'air).

Les produits de la combustion comprennent le dioxyde de carbone (CO₂), l'eau, l'azote et éventuellement l'oxyde de carbone ou l'oxygène.

Généralités sur les fours

De nature très variée, les combustibles peuvent se trouver sous forme :

- de gaz : hydrogène, hydrocarbures gazeux, H₂S,
- de gaz liquéfiés : propane, butane,
- d'hydrocarbures liquides.

La combustion ne peut se produire qu'aux conditions suivantes :

- le combustible, d'une façon générale, se trouve en phase gazeuse,
- le combustible et le comburant doivent être dans des proportions convenables,
- le combustible et le comburant doivent être intimement mélangés.

Qualité de la combustion

La maîtrise de la combustion est primordiale, le rendement thermique et surtout les risques d'explosion en dépendent beaucoup. La combustion peut être théorique, incomplète ou avec excès d'air.

- Combustion neutre : appelée combustion théorique, elle est réalisée sans présence d'oxyde de carbone et d'HC imbrûlés dans les fumées. La quantité d'air nécessaire à la combustion complète est appelée air théorique.
- Combustion complète : en pratique, pour assurer la combustion complète, on utilise une quantité d'air supplémentaire à celle théorique appelée excès d'air exprimé en % de la quantité d'air théorique. On estime que l'excès d'air est de 20 à 30 % pour les combustibles gazeux et 30 à 40 % pour les combustibles liquides. Cet excès d'air dépend, de la température de l'air de combustion et principalement du combustible.
- Combustion incomplète : lorsque l'air fourni à la combustion est inférieur à l'air théorique, la combustion est dite incomplète. Si le manque d'air est faible, on observe la formation de monoxyde de carbone. Pour des manques d'air plus importants, il peut subsister des hydrocarbures imbrûlés ou du carbone sous forme de graphite (noir de fumée).

Généralités sur les fours

Chaleur de combustion

C'est le nombre de calories dégagées par la combustion d'une mole de combustible à des conditions opératoires bien définies ($P = 760$ mm Hg, combustible et O_2 pris à $0^\circ C$, eau totalement condensée).

II.2.2.e Pouvoir calorifique

Définition

Pouvoir calorifique supérieur (PCS) : c'est la quantité de chaleur exprimée en kcal dégagée par la combustion d'un kilogramme (kg) de combustible solide ou liquide ou d'un normal - mètre cube (Nm^3) de combustible gazeux à la température de $0^\circ C$ et la pression atmosphérique. Les produits de la combustion sont ramenés à $0^\circ C$ et l'eau provenant de la combustion est supposée à l'état liquide.

Pouvoir calorifique inférieur (PCI) : c'est la quantité de chaleur exprimée en kcal dégagée dans les mêmes conditions que le PCS, mais l'eau est supposée à l'état vapeur.

Estimation du pouvoir calorifique d'un mélange gazeux

Connaissant la composition d'un mélange gazeux, son pouvoir calorifique peut être estimé par pondération linéaire à partir du pouvoir calorifique de chacun des constituants, en assimilant le mélange gazeux de départ et les produits de la réaction à des mélanges de gaz parfaits.

$$PCI = \sum_i^n PCI_i \cdot y_i$$

- PCI : Pouvoir calorifique du mélange
- PCI_i : Pouvoir calorifique du constituant i

Généralités sur les fours

- y_i : fraction molaire ou volumique du constituant i

Combustibles	Pouvoir calorifique (kcal/kg)		Pouvoir calorifique (kcal/Nm ³)	
	PCS	PCI	PCS	PCI
H ₂	34 550	29 100	3 090	2 610
CO	2 460	2 460	3 060	3 060
CH ₄	13 400	12 030	9 574	8 714
C ₂ H ₆	12 480	11 400	16 801	15 272
C ₃ H ₈	12 012	11 025	23 610	21 655
C ₄ H ₁₀	11 710	10 788	30 329	

Tableau II.2 : Les pouvoirs calorifiques de quelques combustibles gazeux

II.2.2.f Rendement thermique d'un four

Définition

Le rendement (η) d'un four est défini par le rapport de la quantité de chaleur absorbée (Q_a) à la quantité de chaleur libérée uniquement par le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du combustible.

$$\eta(\%) = \frac{Q_a}{M_c \times PCI} \times 100$$

M_c : étant le débit du combustible.

La notion de rendement d'un four apparaît par le fait que le débit de chaleur libérée aux brûleurs par la combustion n'est pas intégralement transmis au fluide procédé. On constate en effet des pertes thermiques qui ont essentiellement deux origines :

Généralités sur les fours

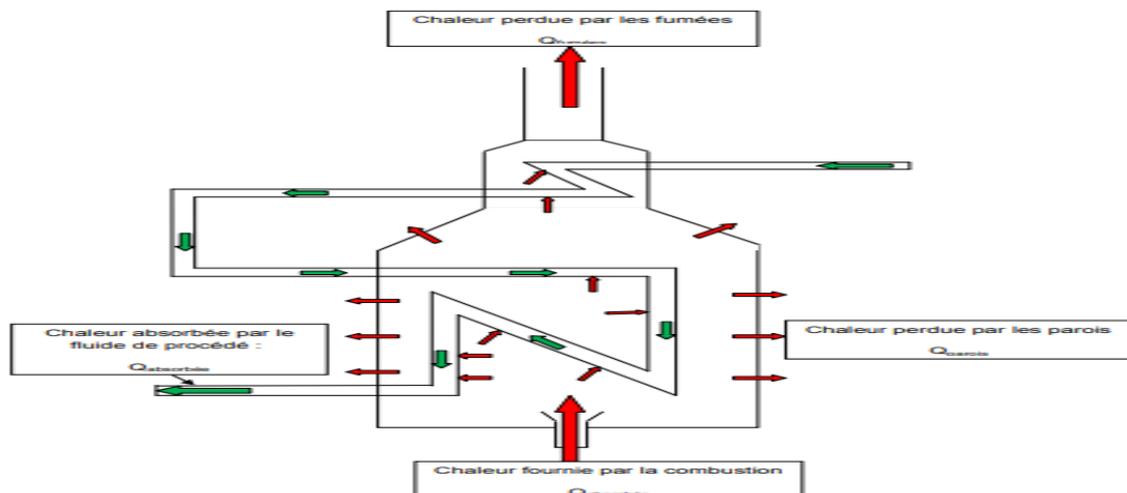
- les pertes par les parois du four (Q_{parois}) : dues aux imperfections de l'isolation thermique par les matériaux réfractaires. Dans le cas des fours récents de grande puissance thermique elles représentent 1 à 2 % de chaleur libérée aux brûleurs ($Q_{\text{entrée}}$). Elles peuvent être beaucoup plus importantes dans le cas de fours anciens dont le réfractaire est défectueux.
- les pertes par les fumées ($Q_{\text{fumées}}$) : qui évacuent à l'atmosphère un débit de chaleur relativement important représentant en général entre 5 et 20 % de celui qui est libéré aux brûleurs.

Le bilan thermique d'un four est : $Q_{\text{entrée}} = Q_{\text{absorbée}} + Q_{\text{fumées}} + Q_{\text{parois}}$
 Ainsi, le rendement d'un four η (éta) peut être défini comme le rapport du débit de chaleur absorbé par le fluide de procédé au débit de chaleur fourni au four par la combustion

$$\eta_{(\%)} = \frac{Q_{\text{absorbée}}}{Q_{\text{fournie}}} \times 100$$

En utilisant le bilan thermique du four, le débit de chaleur absorbée peut encore s'exprimer : $Q_{\text{absorbée}} = Q_{\text{entrée}} - (Q_{\text{fumées}} + Q_{\text{parois}})$ l'expression du rendement devient :

$$\eta_{(\%)} = \frac{Q_{\text{fournie}} - Q_{\text{fumées}} - Q_{\text{parois}}}{Q_{\text{fournie}}} \times 100$$



Généralités sur les fours

Paramètres influent sur le rendement d'un four

- L'excès de l'air (l'augmentation de débit d'air provoque la diminution de rendement car le débit de fumées augmente).
- La qualité de la combustion
- l'encrassement interne et externe de four
- la qualité et le débit de combustible
- la qualité et le débit de la charge à chauffer
- le régime hydrodynamique de fluide à l'intérieur et des fumées à l'extérieur
- l'état des brûleurs
- la qualité de métal
- la disposition des tubes
- la forme géométrique de four
- la composition de l'air
- la température de l'air et de combustible...etc.

II.2.3 Les préchauffages d'air

II.2.3.a Rôle du préchauffeur d'air

Le préchauffeur d'air est un échangeur de chaleur qui permet la récupération de la chaleur perdue par les fumées à la sortie de la zone de convection d'un four avant d'être évacuées vers l'atmosphère par la cheminée, en préchauffant l'air de combustion. Il permet ainsi l'amélioration significative du rendement thermique du four (environ 10 %) par la réduction de la consommation du gaz combustible et par conséquent la diminution de la pollution de l'environnement par la réduction des gaz brûlés évacués vers l'atmosphère.

II.2.3.b Différents types de préchauffeurs d'air

a) **Préchauffeur d'air intégré** : C'est un échangeur constitué de tubes en acier, placé en zone de convection du four et dont la constitution est identique à celle des

Généralités sur les fours

zones de convection classiques de réchauffage de fluide de procédés. La surface d'échange du côté fumées peut être accrue par des ailettes ou des aiguilles.

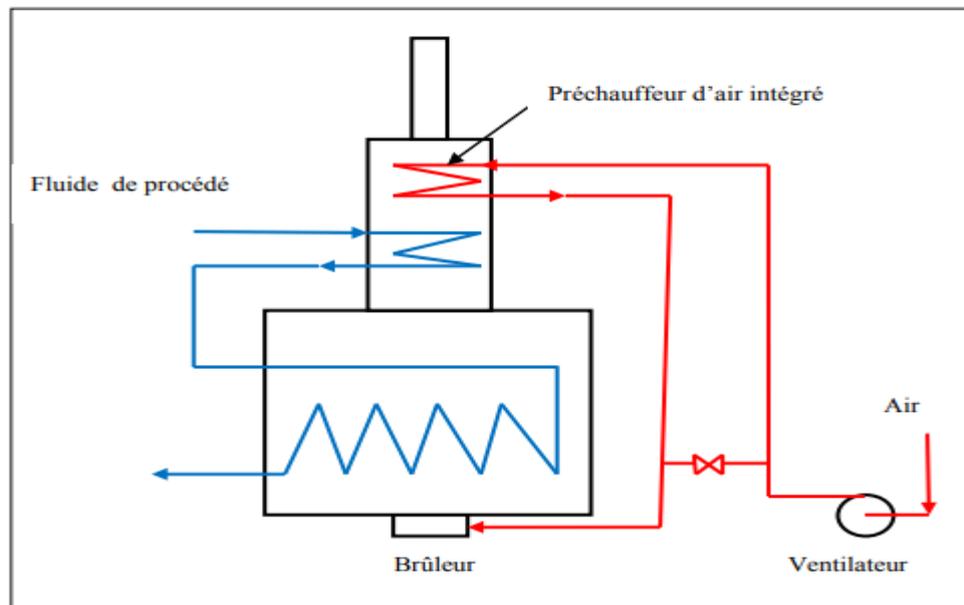


Figure II.7 : préchauffeur d'air intégré

b) **Préchauffeur d'air séparé** : deux types principaux se trouvent sur le marché :

- Le préchauffeur d'air statique : parmi les différentes constructions, le préchauffeur d'air de type statique est constitué de tubes en fonte d'épaisseur importante comportant des ailettes sur les deux circuits (fumées et air). Les tubes sont empilés les uns sur les autres et les brides d'extrémité comportent une gorge recevant un cordant d'étanchéité. Ces brides maintiennent un espace entre les tubes constituant le passage des fumées. En zone froide les tubes ne comportent pas des ailettes du côté air afin d'augmenter la température du métal.

- Le préchauffeur d'air dynamique ou rotatif : le plus fréquemment utilisé, est constitué par un rotor recevant un empilage de tôles minces gaufrées (appelées aussi lamelles). Un moteur assure la rotation du rotor (1 à 2 tours par minute). Les tôles du rotor passent successivement dans le courant de fumées, où elles s'échauffent, et le courant d'air de combustion, qui s'échauffe à leur contact. Des joints métalliques

Généralités sur les fours

d'étanchéité montés sur le rotor assurent une étanchéité imparfaite avec le stator et entre les circuits air et fumées.

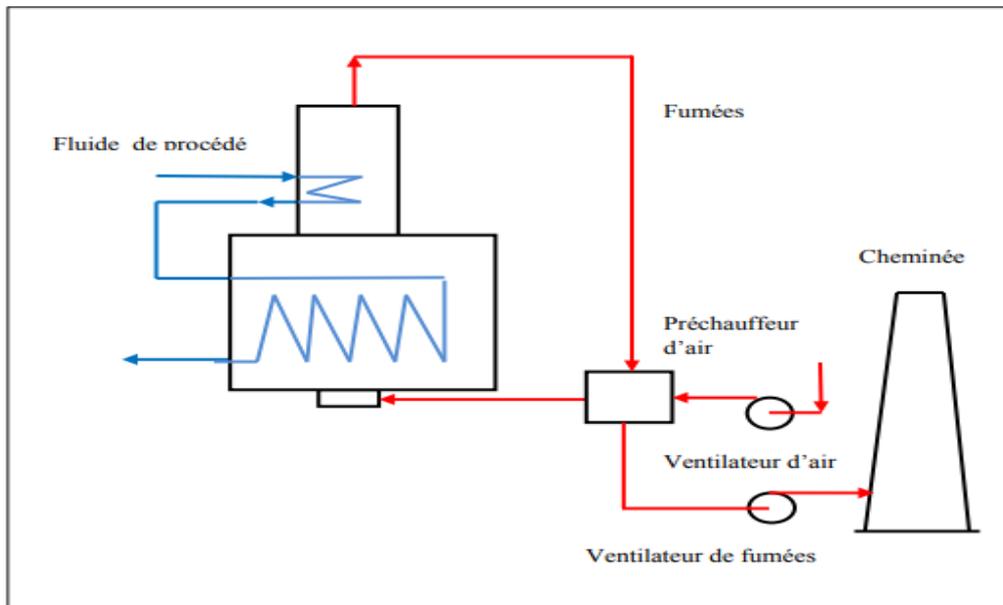


Figure II.8 : préchauffeur d'air séparé

II.2.3.b Avantages et inconvénients du préchauffage de l'air

Les avantages du préchauffage de l'air sont :

- l'amélioration du rendement thermique par la réduction des pertes par les fumées,
- la réduction de la pollution de l'environnement par la diminution de la consommation du gaz combustible,
- l'augmentation de la température de flamme,
- l'amélioration de la réaction de combustion,
- la diminution de l'encrassement par la réduction des suies, du fait, d'une combustion plus complète,
- l'amélioration du transfert de chaleur vers le fluide de procédé.

Les inconvénients du préchauffage de l'air sont :

Généralités sur les fours

L'augmentation de la température de flamme est le principal facteur de la formation de NOx ; cet élément est un polluant qui contribue aux pluies acides. On peut maintenir les émissions de NOx en deçà des limites réglementaires, grâce à la technologie des brûleurs, car l'air de combustion peut être préchauffé jusqu'à environ 400 °C. Au-delà de cette température, la formation de NOx augmente rapidement, et il pourrait être nécessaire de se procurer un dispositif de réduction au point de rejet. Par conséquent, la faisabilité des changements à apporter à la technique de la récupération et l'investissement accru à cet égard pour élever la température de l'air de combustion au-dessus de 400 °C pourraient exiger des compromis entre l'efficacité énergétique, les émissions de NOx et le coût.

II.3 LES FOURS DU TOPPING CONDENSAT DE SKIKDA

II.3.1 Principales caractéristiques

Le four F-101 :

- C'est le four rebouilleur de la colonne de préfractionnement T-101
- le débit de chaque passe est assuré avec la pompe PM-105 A/B et contrôler par les vannes FV-1006 A..... F
- Le four F-101 dispose de six passes
- La température dans le four F-101 augmente de 191 C⁰ à 244 C⁰
- La vaporisation est de 50 %
- Le four est doté de dix brûleurs , chaque brûleur composé de huit becs
- La ligne des brûleurs est disposée par les vannes suivantes : ESDV-1005 (event), ESDV-1001, ESDV-1010, PV-1034.
- La ligne des pilotes est disposée par les vannes suivantes : ESDV- 1006 (event), ESDV-1002 , PCV-1001.

Généralités sur les fours

Le four F-102 :

- C'est le four atmosphérique qui alimente la colonne de distillation atmosphérique T-103
- le débit de chaque passe est assuré avec la pompe PM-106 A/B et contrôler par les vannes FV-1011 A..... D
- Le four F-101 dispose de quatre passes
- La température dans le four F-102 augmente de 191 C^0 à 216 C^0
- La vaporisation est de 80 % environ
- Le four est doté de huit brûleurs , chaque brûleur composé de huit becs
- La ligne des brûleurs est disposée par les vannes suivantes : ESDV-1007 (event), ESDV-1003, ESDV-1011, PV-1043.
- La ligne des pilotes est disposée par les vannes suivantes : ESDV- 1008 (event), ESDV-1004, PCV-1002.

Le four F-103 :

- C'est le four rebouilleur de la colonne de distillation atmosphérique T-103
- le débit de chaque passe est assuré avec la pompe PM-113 A/B/C et contrôler par les vannes FV-1117 A..... H
- Le four F-103 dispose de huit passes
- La température dans le four F-103 augmente de 356 C^0 à 361 C^0
- La vaporisation est de 50 %
- Le four est doté de dix brûleurs , chaque brûleur composé de huit becs
- La ligne des brûleurs est disposée par les vannes suivantes : ESDV-1103, ESDV-1101, ESDV-1107, PV-1134.
- La ligne des pilotes est disposée par les vannes suivantes : ESDV- 1104, ESDV- 1102, PCV-1003.

Généralités sur les fours

II.3.2 Fonctionnement

La raffinerie de condensat RA2K comporte trois fours 100-F-101, 100-F-102 et 100-F103 dont les caractéristiques principales sont données dans le titre précédent. Les trois fours ont la particularité d'être conçus avec un préchauffeur d'air commun et une cheminée commune. Chaque four peut fonctionner tout seul avec le préchauffeur d'air en service. Les fumées, à la sortie de la zone de convection de chaque four, sont mélangées et refroidies dans le préchauffeur d'air avant d'être évacuées par la cheminée vers l'atmosphère à l'aide de ventilateurs extracteurs (les deux doivent être en service). L'air de combustion est refoulé par deux ventilateurs (l'un en service et l'autre en réserve) dans le préchauffeur d'air puis envoyé aux brûleurs. Un ventilateur doit être toujours en service car les trois fours sont conçus pour un tirage forcé seulement. Les fours sont équipés d'instruments de mesure, de contrôle et de sécurité pour surveiller la chambre de combustion (gaz combustible, air de combustion, flamme, température de la chambre de combustion, températures de peau des tubes, etc...). Des systèmes de sécurité appropriés peuvent arrêter les fours si les conditions de fonctionnement ne répondent pas à celle prescrites par les normes d'exploitation afin d'éviter les risques d'incidents.

Généralités sur les fours

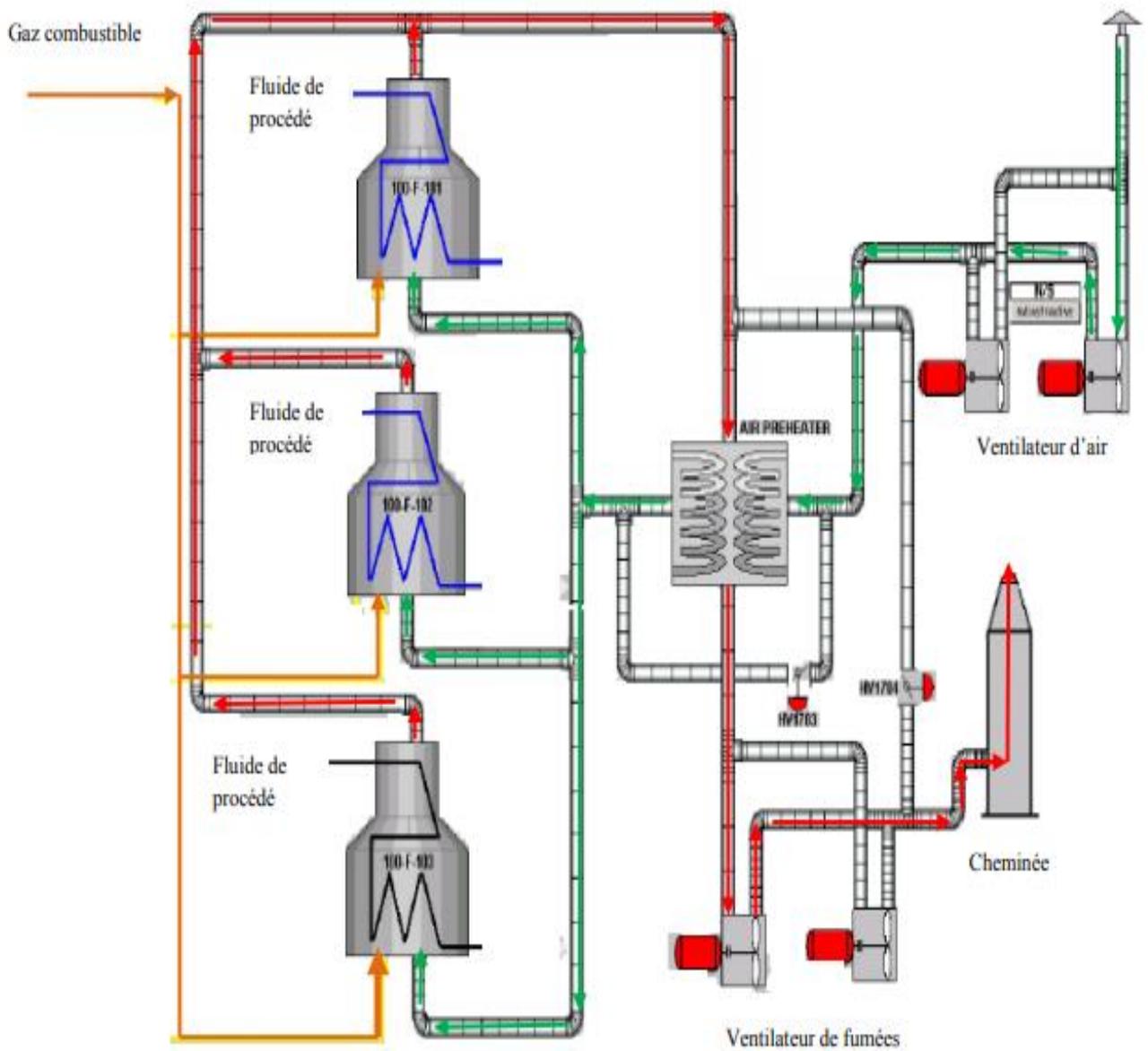


Figure II.9 : Principe de fonctionnement des trois fours avec APH, circuits gaz combustible, air de combustion et fumée.

II.4 SECURITE DES FOURS PETROLIERS

II.4.1 Importance de la sécurité

La sécurité d'un four consiste à éliminer tous les risques éventuels et à réduire à un degré minimal les dangers afin de protéger l'intégrité du matériel et d'éviter les préjudices humains. Elle est assurée par des instruments avec déclenchement d'alarme ou intervention directe sur la marche du four. Les principales fonctions de la sécurité d'un four sont :

- La coupure des feux par pression du combustible basse,
- Le contrôle de flamme par pilotes ou cellules,
- La surpression limitée par soupape et portes d'explosion,
- Le verrouillage autorisant l'alimentation en air de combustion et en gaz combustible
- L'ouverture du registre à la défaillance de la commande,
- L'alimentation en vapeur d'étouffement,
- L'alimentation en vapeur de protection à l'intérieur des tubes.

II.4.2 Sécurité des brûleurs

Les fonctions de sécurité montrent que le risque se situe essentiellement au niveau des brûleurs. Pour cela, un soin particulier doit être réservé aux équipements de chauffe. En effet, lorsque les variations de débit sont grandes, il est de plus en plus nécessaire de prévoir des sécurités en cas d'extinction (le risque est important aux faibles débits du combustible). Ce n'est pas l'extinction en elle-même qui est à craindre, mais ses conséquences. Lorsque un brûleur s'éteint et l'arrivée du gaz combustible a toujours lieu d'être, l'enceinte des fumées est occupée par un mélange inflammable qui peut s'allumer au contact d'un point chaud (pot de suies en ignition, torche d'allumage ou brûleur de soutien laissé en service). La combustion brusque du mélange donne lieu à une surpression instantanée importante pouvant produire de très graves dégâts.

Généralités sur les fours

II.4.3 Comportement sécuritaire du personnel

L'amélioration de la sécurité des personnes et des installations industrielles ne peut se faire sans la formation en sécurité qui consiste à intervenir sur le changement du comportement sécuritaire individuel et collectif du personnel afin d'assurer au mieux la sécurité au travail en anticipant la survenance des accidents. La sécurité en général, et industrielle en particulier, est basée sur l'application d'un certain nombre de barrières mentales et techniques par les travailleurs afin d'empêcher les accidents, dus aux imprévus, de se produire. Les barrières mentales sont la priorité première, la conformité, le dialogue ouvert, l'évaluation continue des risques et le non à l'indifférence.

- ❖ **Priorité première** : donner la priorité à la sécurité même s'il s'agit d'arrêter la production.
- ❖ **Conformité** : respecter les procédures et les règles existant dans les documents officiels de l'unité.
- ❖ **Dialogue ouvert** : développer le dialogue et la communication sur les questions relatives à la sécurité avec tous les travailleurs quelle que soit leur position hiérarchique.
- ❖ **Évaluation continue des risques** : avant d'entamer un travail, même si l'intervenant a une expérience, il faut être toujours attentif pour évaluer les risques d'une façon continue car des imprévus peuvent arriver.
- ❖ **Non à l'indifférence** : prendre soin des uns et des autres, corriger l'autre quand il fait quelque chose mal et sans respect des règles de la sécurité, prévenir des dangers et ne jamais détourner les yeux devant une situation où une personne s'expose à un risque.

Le respect de ces 05 barrières est très important pour atteindre le 0 accident. L'accident est une erreur matérielle, derrière laquelle se cache toujours une erreur

Généralités sur les fours

humaine, car ce matériel nécessite un entretien, une maintenance. L'origine et la cause sont hu

Chapitre III

- I Présentation de la raffinerie de Skikda (RA2K)**
- II Fonctionnement de l'unité.**

Présentation de la raffinerie de Skikda (RA2K)

III.1 PRESENTATION DE LA RAFFENERIE DE SKIKDA (RA2K)

III.1.1 Introduction

La raffinerie Topping de condensat de Skikda communément appelé RA2K est conçue pour une capacité de traitement de cinq million de tonnes métriques par an de condensat issue des champs pétroliers algérien, en vue de produire le butane, le naphtha, le kérosène, le gasoil léger et le gasoil lourd. En outre, des facilités sont installées pour le stockage, le traitement et le transfert du condensat et de ces produits. [1]

III.1.2 Historique du complexe Topping (RA2K)

SONATRACH avait projeté de réaliser l'usine de Topping condensat en partenariat et avait lancé deux appels d'offre, le premier pour la recherche d'un partenaire et le second pour la réalisation de l'usine. Sur les deux sociétés qui avaient soumis des offres techniques, à savoir CNPC (Chine) et Itochu (Japon), seule la compagnie chinoise s'était présente pour l'offre commerciale de l'appel d'offre « recherche d'un partenaire ». Pour le second appel d'offre concernant la réalisation, plusieurs sociétés s'étaient manifestées. Finalement deux compagnies ont été sélectionnées à l'issue de cette phase : CNPC et SAIPEM. C'est le 10 Mai 2005 (CNPC) a décroché le contrat pour la réalisation de la raffinerie de topping de condensat de Skikda pour un montant d'environ 390 millions de dollars.

Elle a été réalisée en deux lots distincts :

- Lot 1 : Réalisation d'une usine de Topping de condensat.
- Lot 2 : Extension des installations de stockage et d'expédition de la raffinerie de pétrole brut existante (RA1K), pour stocker et expédier les produits issus du topping condensat.

Présentation de la raffinerie de Skikda (RA2K)

Evènements marquants :

- Le 01 Décembre 2005 : Entrée en vigueur du contrat ;
- Le 20 Mai 2009 : Admission du GN et démarrage des fours
- Le 02 juin 2009 : Admission de la charge condensat de RTE
- Le 25 juillet 2009 : Démarrage des unités Procès ;
- Le 06 Novembre 2009 : Tests de Performance ;
- Le 14 Janvier 2010 : Réception Provisoire. . [5]

Ce complexe a été conçu pour fonctionner selon trois cas de marche, définis ci-après :

- Cas A : production maximal de naphta et production maximal du gasoil (cas de base).
- Cas B : production maximal de kérosène Jet A1.
- Cas C : production maximal de naphta et production minimal de gas-oil.

Mode d'exploitation			
Produits	Cas A	Cas B	Cas C
Butane	111.9	111.9	111.9
Naphta	4038.1	3470.1	4038.1
Jet A1	-	992.5	425.6
Gas-oil Léger	724.9	299.9	299.9
Gas-oil Lourd	115.2	115.2	115.2
Pertes	9.9	10.4	9.3
Totale	5000	5000	5000

Tableau III.1 : mode d'exploitation du complexe topping condensat.

Présentation de la raffinerie de Skikda (RA2K)

III.1.3 Localisation géographique du site

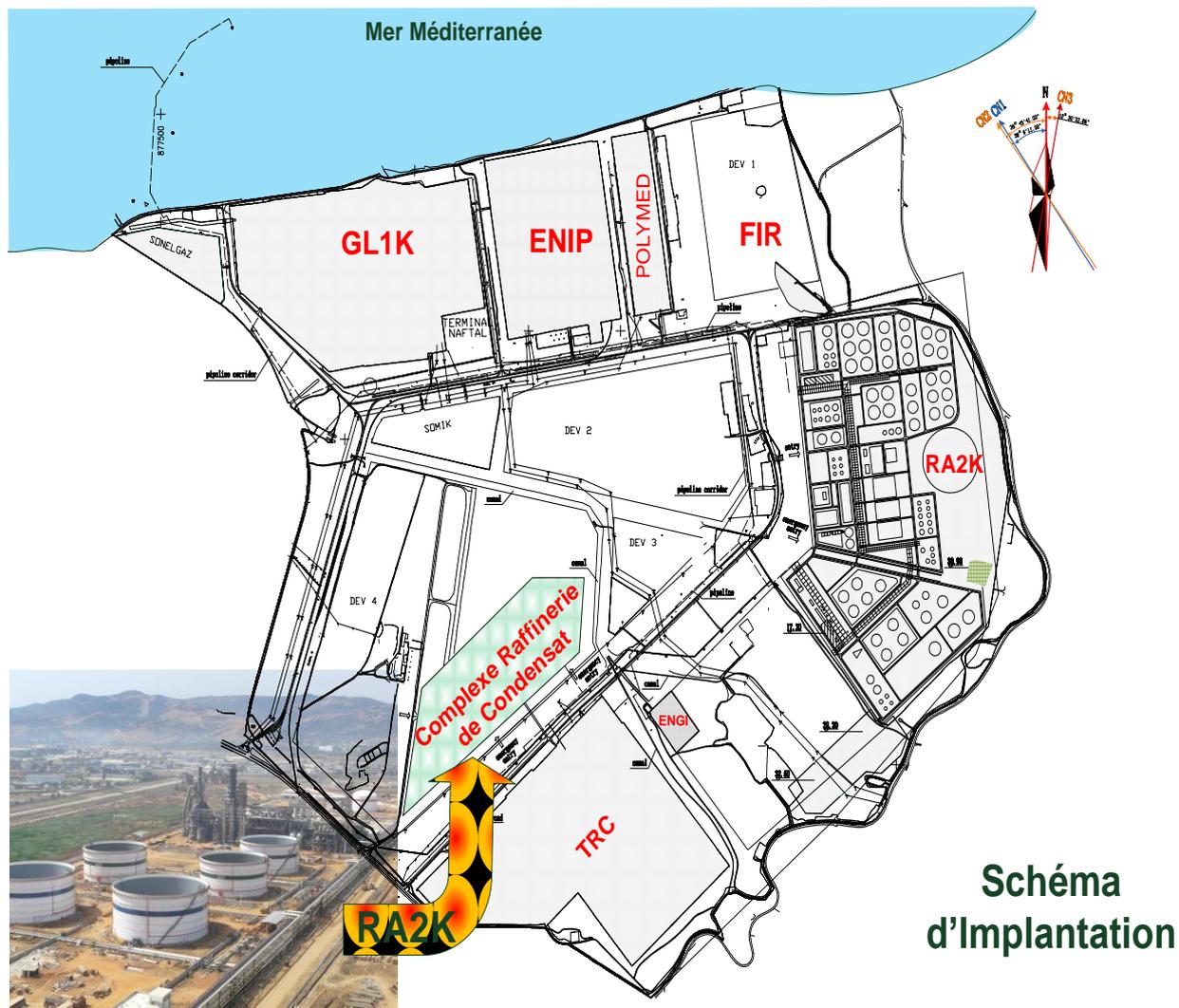
Le complexe Topping de Condensat (RA2K) est situé dans l'enceinte de la zone industrielle de Skikda, à l'Est de la ville de Skikda, en dehors du tissu urbain, dans le périmètre de l'ancien aéroport.

Les principaux sites industriels localisés dans les environs sont :

- Le complexe de liquéfaction du gaz naturel(GL1K) au nord ;
- Le complexe des matières plastiques (CP1K) au nord-est ;
- POLYMED au nord-est ;
- La raffinerie de pétrole (RA1K) à l'Est ;
- Le terminal de stockage du pétrole brut et du condensat (RTE) au sud.

Il s'étend sur une superficie d'environ 45 hectares et comprend les unités de production, les différentes utilités, les zones de réception de la matière première, de stockage et de transfert des produits finis.

Présentation de la raffinerie de Skikda (RA2K)



III.1.4 Conception générale du Complexe

Le complexe comprend plusieurs unités et installations de traitement à savoir:

- Unité de Distillation atmosphérique (Unité-100).
- Unité de traitement de kérosène (Unité-200).
- Installations de stockage et transport de produits finis (Unité300).
- Système de torche (Unité-400).
- Utilités (Unité-500).

Présentation de la raffinerie de Skikda (RA2K)

Les principaux équipements de l'unité sont :

- Colonne de préfractionnement : 100-T-101
- Colonne de distillation atmosphérique : 100-T-103
- Colonne de distillation sous vide : 100-T-401
- Colonne de stabilisation des essences: 100-T-201
- Colonne de dépropaniseur: 100-T-301
- Fours: 100-F-101, 100-F-102 et 100- F-103

III.2 FONCTIONNEMENT DE L'UNITE

III.2.1 Train de préchauffe

La charge est pompée aux installations de l'unité 100 à une pression de limite de batterie de 20 bars et une température de 30°C. Le Condensât est ensuite chauffé dans un train d'échangeurs de préchauffage avant d'entrer au préfractionneur (colonne de pré-distillation 100-T-101). Le train d'Echangeur de Préchauffage est divisé en deux branches parallèles en vue de faciliter le fonctionnement à 50 % du débit.

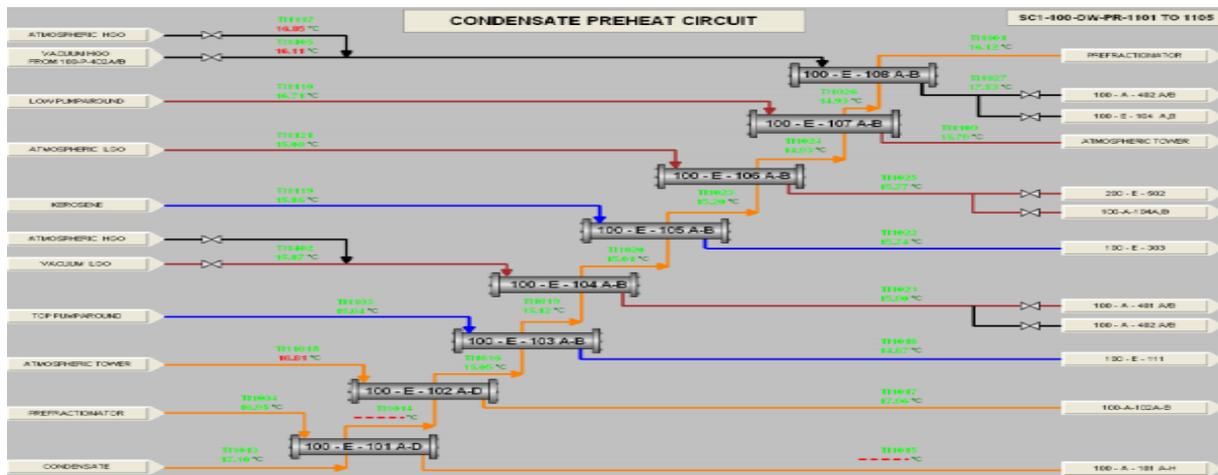


Figure III.1: la section de préchauffe

Présentation de la raffinerie de Skikda (RA2K)

III.2.2 Préfractionnement

La colonne 100-T-101 (préfractionneur) a pour but de préfractionner le Condensat en trois produits:

- Coupe de tête (gaz et naphta).
- Coupe latérale (naphta stable.)
- Coupe de fond (condensat stable).

La colonne est conçue avec un ensemble de 35 plateaux, et reçoit le Condensat partiellement vaporisé au plateau n° 28.

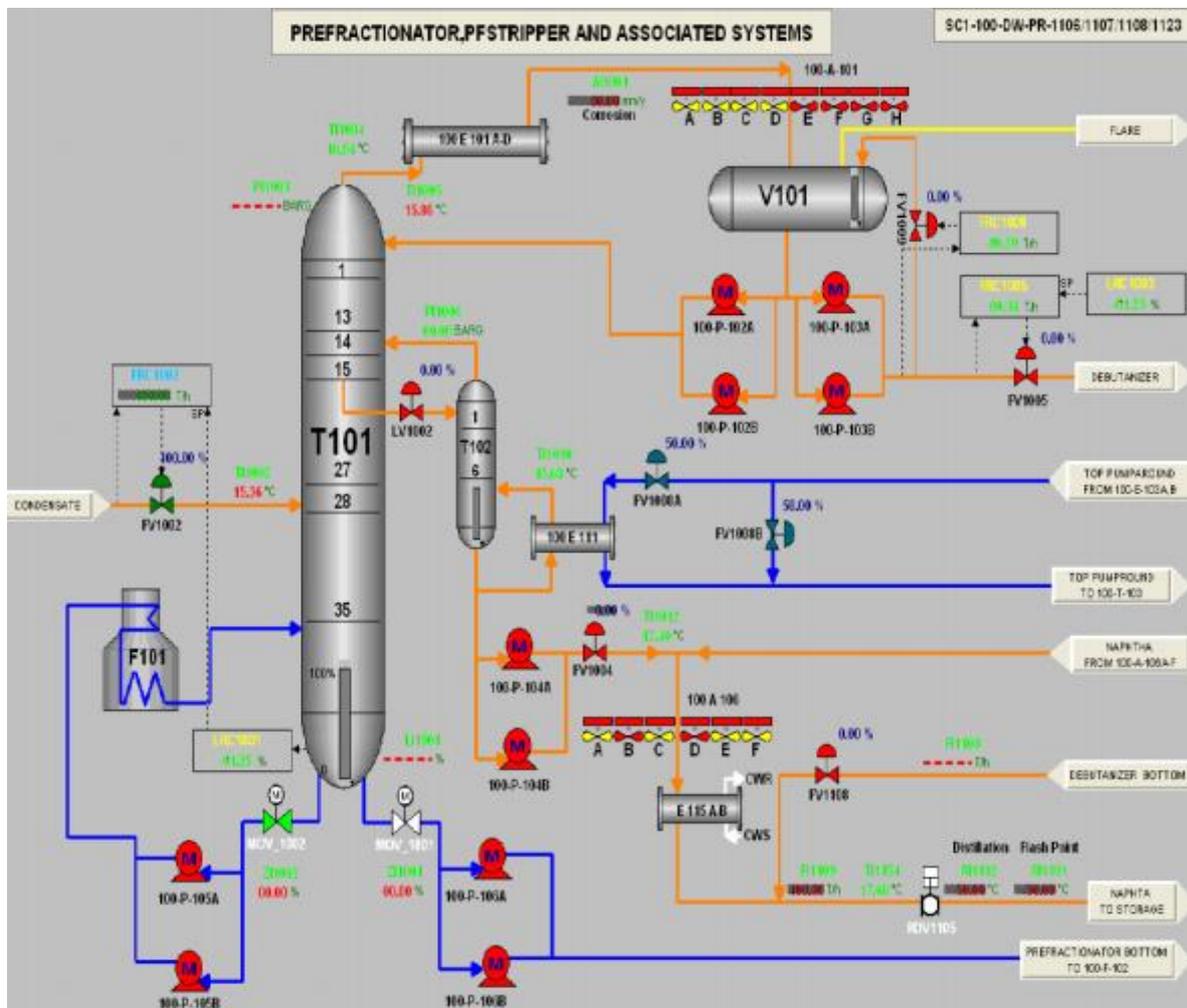


Figure III.2 : la section de préfractionnement de l'unité 100

Présentation de la raffinerie de Skikda (RA2K)

III.2.4 Distillation sous vide

Le but de la tour sous vide 100-T-401 est de récupérer une partie du LGO contenu dans le résidu atmosphérique issue du fond de la tour atmosphérique. Le LGO sous vide est mélangé avec le LGO atmosphérique, et le HGO du fond de la tour sous vide est envoyé vers stockage.

Le fractionnement est effectué au moyen de 2 zones de garnissages assurant le contact liquide_vapeur et séparé en deux coupes:

- Coupe latérale (Gasoil léger)
- Coupe de fond (Gasoil lourd)

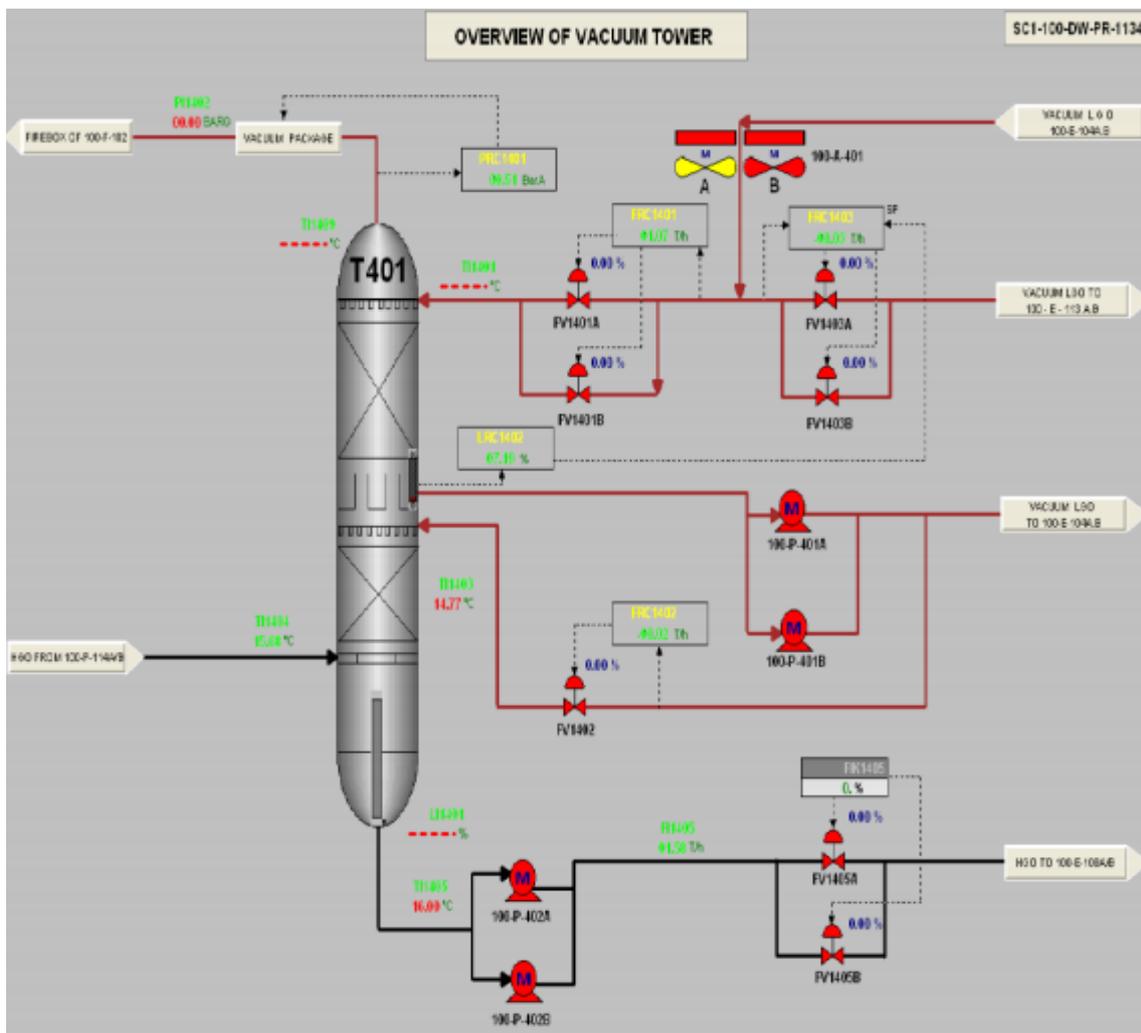


Figure III.4 : la section sous vide de l'unité 100.

Présentation de la raffinerie de Skikda (RA2K)

III.2.5 Stabilisation des essences

Cette étape est assurée par la colonne 100-T-201 appelée débutaniseur ou colonne de stabilisation, qui nous donne deux produits:

- En tête, la coupe Gaz de Pétrole Liquéfiés (GPL).
- Au fond, la coupe essence dite "stabilisée".

La colonne est équipée de 50 plateaux, l'alimentation est effectuée au plateau n° 26.

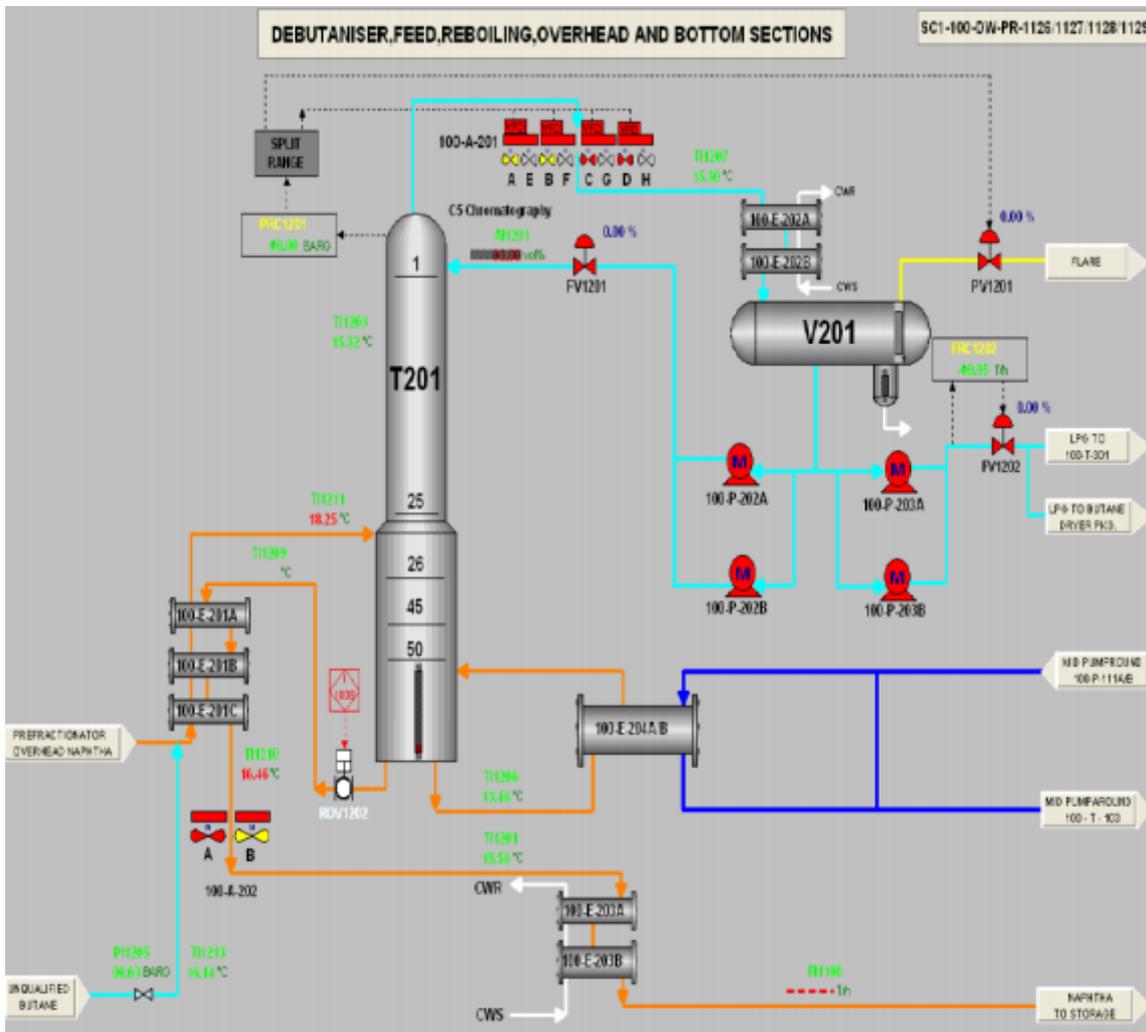


Figure III.5 : Section de stabilisation des essences.

Présentation de la raffinerie de Skikda (RA2K)

III.2.6 Section de séchage de butane

Le système de séchage de butane contient deux colonnes à tamis moléculaire, une est utilisée pour le séchage et l'autre pour la régénération, le butane humide est dirigé en une direction vers le haut par la tour de séchage, où le tamis moléculaire absorbe de l'eau existante dans le butane. L'objectif de cette section est de sécher le butane jusqu'à 20 ppm.

III.2.7 Les utilities

A l'exception de l'air instrument et l'air service qui sont produits par les moyens propres du complexe, les utilities sont fournies par les structures suivantes :

- Le gaz naturel : SONATRACH - RTE/TRC.
- L'azote : Entreprise ENGI. MESSER.
- L'électricité : Entreprise SONELGAZ.
- L'eau industrielle : Entreprise EPDEMIA.
- La vapeur d'eau : Raffinerie RA1K.

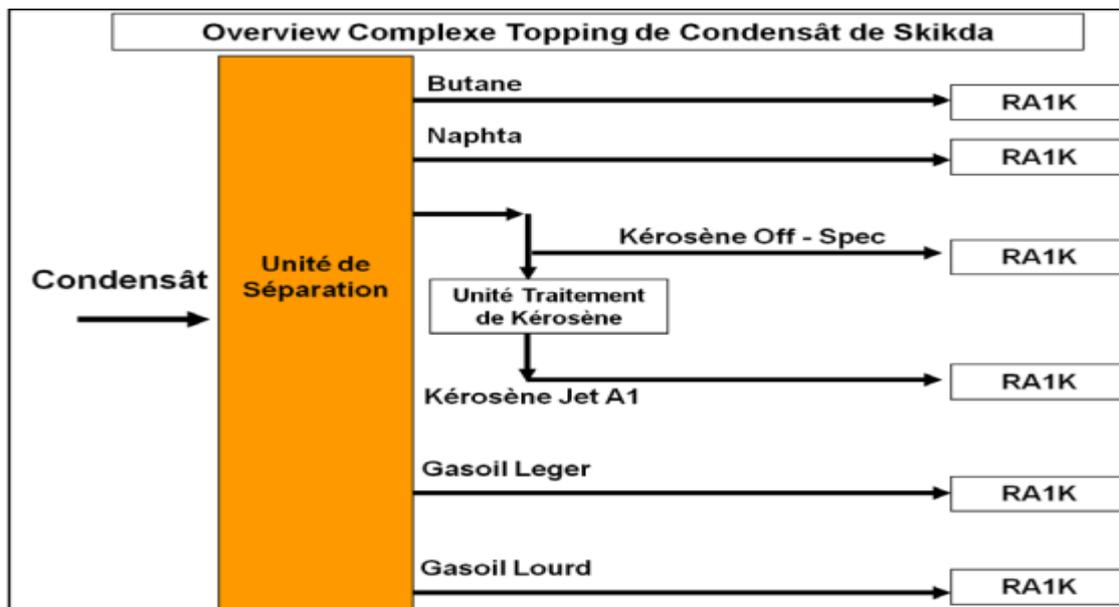


Figure III.6 : le schéma synoptique du complexe RA2K.

Présentation de la raffinerie de Skikda (RA2K)

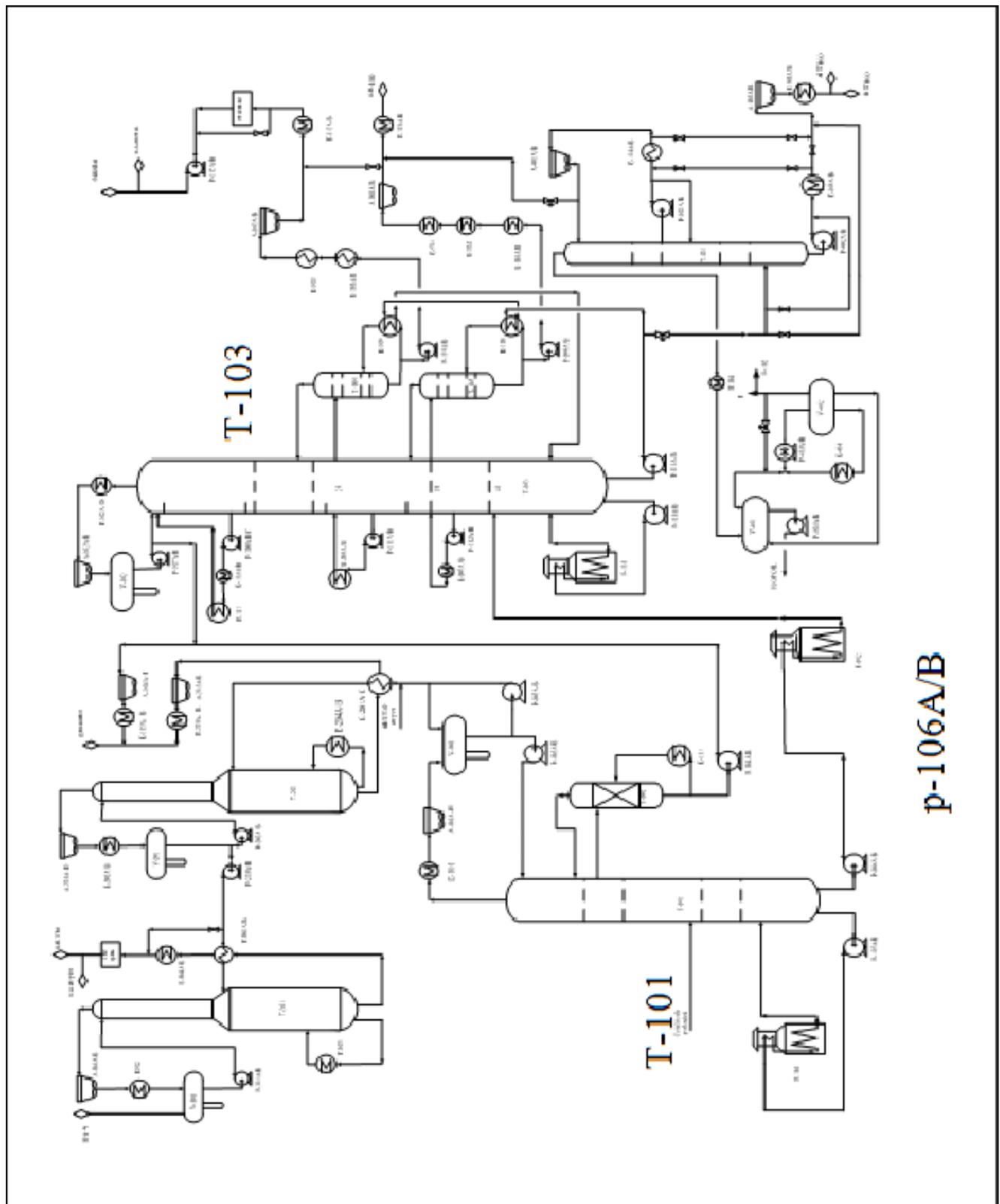


Figure III.7 : le schéma technologique de l'unité de production 100

Chapitre IV

- 1- La problématique.
- 2- Les données.
- 3- Composition de combustible-comburant.
- 4- La composition des fumées et estimation des pertes par fumées.
- 5- Estimation des pertes par parois
- 6- Le rendement du four sans et avec l'APH.
- 7- Interprétation des résultats
- 8- Etude technico-économique lors de l'emplacement de l'APH et gain énergétique.

Etude énergétique du four (partie calcule)

VI.1 LA PROBLEMATIQUE

L'unité 100 du complexe de Topping RA2K utilise trois fours : Four rebouilleur de la colonne de préfractionnement 100-F-101; Four de charge de la colonne de distillation atmosphérique 100-F-103 ; Four rebouilleur de la colonne de distillation atmosphérique 100-F-103, sont menus d'une cheminée associée pour évacuer les fumées arrivant de la zone de convection à des températures élevées et une composition contenant un pourcentage assez élevé des constituants polluants vers l'atmosphère. Ce problème est résolu par le préchauffeur d'air déjà installé dont les caractéristiques sont récapitulées dans les tableaux de l'annexe D, il permet à la fois de baisser la température des rejets des fumées de 407 °C à 161 °C ainsi afin d'éviter le problème de pollution en diminuant la quantité de gaz combustible utilisé pour l'alimentation du four.

Les fours sont conçus pour un tirage forcé ; le refoulement d'air de combustion vers le préchauffeur d'air vers les brûleurs est fait par deux ventilateurs travaillant au tour de rôle pour chaque four.

Le préchauffeur d'air est menu de deux bypass; l'un pour les fumées et l'autre pour l'air; équipées des vannes automatiques (HV1703 et HV1704), qui sont commandées automatiquement par le fonctionnement des ventilateurs extracteurs des fumées qui doivent travailler en même temps. Si l'un des deux ventilateurs extracteurs s'arrête les vannes s'ouvrent et les fumées sont évacuées directement vers l'atmosphère.

Après une période de fonctionnement de l'APH, la vanne permet à la majeure partie des fumées de passer directement à la cheminée. Laissant un écoulement insuffisant des fumées qui sont envoyées vers les ventilateurs extracteurs d'APH provoquant leur perturbation par suite l'isolement de l'APH et l'air de combustion sera envoyé directement aux brûleurs par le by-pass. C'est le problème qui est survenu depuis octobre 2020.

Etude énergétique du four (partie calcule)

Dans ce qui suit on va mettre en évidence le gain d'énergie dans les 3 fours lors du fonctionnement de préchauffeur ainsi son effet sur l'amélioration du rendement du four et la préserve de l'environnement dans le but de sensibiliser le personnel RA2K responsable de maintenance à intervenir sur site pour résoudre ce problème et remettre en marche cet équipement de grande importance.

VI.2 L'OBJECTIF DE L'ETUDE

- Calcul du Rendement thermique des trois fours avec et sans préchauffeur d'air.
- Calcul du gain énergétique lors de la mise en service du préchauffeur d'air.

Partie 01

VI.3 LES PARAMETRES A DETERMINER

- La quantité de l'oxygène nécessaire pour une bonne combustion (théorique et réelle).
- La quantité et la composition des fumées formées théorique et réelle.
- Le pouvoir calorifique inférieur du gaz combustible (fuel gaz).
- la température des fumées à la sortie avec et sans préchauffeur.
- La détermination des enthalpies aux différentes températures de travail pour le calcul de la quantité de chaleur absorbée.
- Calcul du rendement thermique des fours pour cela il existe deux méthodes l'une est directe et l'autre indirecte :

Etude énergétique du four (partie calcul)

Méthode directe : Elle est basée sur la détermination de la quantité de chaleur fournie et celle absorbée par le fluide de procédé dans le cas où d'autres fluides externes tel que la production de la vapeur d'eau dans la zone de convection.

$$\eta(\%) = \frac{Q \text{ absorbée}}{Q \text{ fournie}} * 100 \quad (\text{IV.1})$$

Méthode indirecte : Elle est basée sur la détermination de la quantité de chaleur fournie ou libérée et des pertes de chaleur par les parois du four et par les fumées. Dans cette étude, nous avons choisi la méthode indirecte en calculant les pertes par les fumées (les plus importantes) et en estimant les pertes par les parois, jugées faibles du fait que les fours de l'unité 100 sont récents et par conséquent le matériau réfractaire de la chambre de combustion est en bon état.

$$\eta(\%) = \frac{Q \text{ fournie} - (Q \text{ fumées} + Q \text{ parois})}{Q \text{ fournie}} * 100 \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

Q fournie: c'est la quantité totale de la chaleur libérée.

Q fumées: c'est la quantité de la chaleur perdue par les fumées elle représente 5 à 20 % de la chaleur fournie par la combustion.

Q parois : c'est la quantité de la chaleur perdue à travers le garnissage réfractaire représente 2% de la chaleur fournie par la combustion car les fours de complexe RA2K sont récents.

VI.3 LES DONNEES

Le taux de marche considéré est de 100%. Les paramètres opératoires des trois fours sont reportés dans les tableaux suivants.

Etude énergétique du four (partie calcule)

<i>Four F101 (Rebouilleur de la colonne de préfractionnement T101)</i>		
Les paramètres de combustion	Avec préchauffeur	Sans préchauffeur
T des fumées entrées préchauffeur d'air (°C)	389	413
T des fumées sortie préchauffeur d'air (°C)	163	407
Teneur en O ₂ dans les fumées (%)	3.76	3.10
T de l'air de combustion entrée préchauffeur d'air (°C)	25	17
T de l'air de combustion sortie préchauffeur d'air (°C)	251	17
Débit du gaz combustible (Nm ³ /h)	2830	3127
Fluide de procédé : fond de la colonne T101 (condensat stabilisé)		
Débit du fluide (t/h)	404	
Température d'entrée du fluide (°C)	178	
Température de sortie du fluide (°C)	211.4	
Humidité relative (%)	65	

Tableau IV.1 : paramètres opératoires de four F101

<i>Four F102 (préchauffeur de la colonne de distillation atmosphérique T102)</i>		
Les paramètres de combustion	Avec préchauffeur	Sans préchauffeur
T des fumées entrées préchauffeur d'air (°C)	371	405
T des fumées sortie préchauffeur d'air (°C)	163	407

Etude énergétique du four (partie calcule)

Teneur en O ₂ dans les fumées (%)	2.80	3.20
T de l'air de combustion entrée préchauffeur d'air (°C)	25	17
T de l'air de combustion sortie préchauffeur d'air (°C)	251	17
Débit du gaz combustible (Nm ³ /h)	2380	3018
Fluide de procédé : charge de la colonne T103 (fond de la colonne de préfractionnement T101)		
Débit du fluide (t/h)	275	
Température d'entrée du fluide (°C)	178	
Température de sortie du fluide (°C)	192	
Humidité relative (%)	65	

Tableau IV.2 : paramètres opératoires de four F102

<i>Four F103 (Rebouilleur de la colonne de distillation atmosphérique T103)</i>		
Les paramètres de combustion	Avec préchauffeur	Sans préchauffeur
T des fumées entrées préchauffeur d'air (°C)	359	365
T des fumées sortie préchauffeur d'air (°C)	163	407
Teneur en O ₂ dans les fumées (%)	4.01	3.10
T de l'air de combustion entrée préchauffeur d'air (°C)	25	17
T de l'air de combustion sortie préchauffeur d'air (°C)	251	17
Débit du gaz combustible (Nm ³ /h)	1311	1884

Etude énergétique du four (partie calculée)

Fluide de procédé : fond de la colonne T103 (gasoil lourd atmosphérique)	
Débit du fluide (t/h)	1202
Température d'entrée du fluide (°C)	340
Température de sortie du fluide (°C)	355.3
Humidité relative (%)	65

Tableau IV.3 : paramètres opératoires de four F103

VI.5 LA COMPOSITION DU GAZ COMBUSTIBLE

Les pourcentages volumiques des constituants sont pris à partir 100 Nm³ du gaz combustible.

Constituants	Formule chimique	% Volumique (y _i)
Méthane	CH ₄	78.23
Ethane	C ₂ H ₆	6.45
Propane	C ₃ H ₈	1.98
Butène	C ₄ H ₈	0.19
Iso-butane	iC ₄ H ₁₀	1.14
n-butane	nC ₄ H ₁₀	7.07
Iso-pentane	iC ₅ H ₁₂	0.32
n-pentane	nC ₅ H ₁₂	0.47
Dioxyde de carbone	CO ₂	0.17
Azote	N ₂	3.98

Etude énergétique du four (partie calculée)

Totale

100

Tableau IV.4 : les pourcentages volumiques des constituants pour 100Nm³ de gaz combustible.

VI.6 REACTIONS DE COMBUSTION

Les équations de combustion sont de forme générale :



- $CH_4 + 2 O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$
- $C_2H_6 + 7/2 O_2 \longrightarrow 2CO_2 + 3H_2O$
- $C_3H_8 + 5 O_2 \longrightarrow 3CO_2 + 4H_2O$
- $C_4H_8 + 6 O_2 \longrightarrow 4CO_2 + 4H_2O$
- $iC_4H_{10} + 13/2 O_2 \longrightarrow 4CO_2 + 5H_2O$
- $nC_4H_{10} + 13/2 O_2 \longrightarrow 4CO_2 + 5 H_2O$
- $iC_5H_{12} + 8 O_2 \longrightarrow 5CO_2 + 6H_2O$
- $nC_5H_{12} + 8 O_2 \longrightarrow 5CO_2 + 6H_2O$

A partir de 100 Nm³/h du gaz combustible, on détermine les quantités théoriques (VCO₂, VH₂O et VN₂) ainsi VO₂ constituants de l'air et des fumées de combustion selon les coefficients stœchiométriques.

Constituants	% Volumique (y _i)	VO ₂	VCO ₂	VH ₂ O
Méthane	78.23	156.46	78.23	156.46
Ethane	6.45	22.575	12.9	19.35

Etude énergétique du four (partie calculé)

Propane	1.98	9.9	5.94	7.92
Butène	0.19	1.14	0.76	0.76
Iso-butane	1.14	7.41	4.56	5.70
Iso-butane	7.07	45.95	28.28	35.35
Iso-pentane	0.32	2.56	1.60	1.92
n-pentane	0.47	3.76	2.35	2.82
Dioxyde de carbone	0.17	/	/	/
Azote	3.98	/	/	/
Total (Nm ³)	100	249.75	134.62	230.28

Tableau IV.5 : les quantités théorique de O₂, H₂O et CO₂ contenant dans l'air et les fumées pour 100 Nm³ /h.

VI.7 COMPOSITION DE COMBURANT

VI.7.1 La quantité d'oxygène nécessaire à la combustion pour 100 Nm³ de combustible

Ce calcul est basé sur la maîtrise de la combustion avec un excès d'air requis pour un fonctionnement convenable des brûleurs (20 % pour un combustible gazeux).

Il est possible de faire fonctionner les brûleurs avec un excès d'air inférieur à celui requis et ceci peut être souhaitable puisqu'il en résulte une augmentation du rendement du four.

a) La quantité théorique : déjà calculée selon les coefficients stœchiométriques

$$Q_{th} = 249.75 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Etude énergétique du four (partie calculée)

b) La quantité pratique en tenant compte l'excès d'air 20% :

$$Q_p = Q_{th} + \alpha \times Q_{th} \quad (\text{IV.3})$$

$$Q_p = Q_{th} (1 + 0.2) = 299.7 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

VI.7.2 La Quantité d'air nécessaire à la combustion pour 100 Nm³ de combustible

Si on admet que la composition de l'air est :

Pourcentage de l'azote : 79%.

Pourcentage de l'oxygène : 21%

a) La quantité théorique est : $L_T = \frac{100}{21} Q_{th} \quad (\text{IV.4})$

$$L_T = 1189.28 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

b) La quantité pratique : $L_p = L_T + \alpha \times L_T \quad (\text{IV.5})$

$$L_p = L_T (1 + 0.2) = 1427.14 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

VI.7.3 La Quantité d'azote contenue dans l'air de combustion

La quantité pratique : $V_{N_2} = \frac{79}{21} Q_p = 1127.44 \text{ Nm}^3/\text{h}$

VI.7.4 La teneur de la vapeur d'eau dans l'air de combustion

Elle est donnée par l'équation d'Avogadro-Dalton : $\frac{P_{H_2O}}{P - P_{H_2O}} = \frac{V_{H_2O}}{V_{air}} \quad (\text{IV.6})$

$$V_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P - P_{H_2O}} \times V_{air}$$

Etude énergétique du four (partie calculée)

P H₂O : C'est la pression partielle de l'eau tel que :

$$P_{H_2O} = \text{tension de vapeur d'eau à } 25^{\circ}\text{C} \times \text{humidité}$$

P : C'est la pression totale.

$$V_{H_2O} = \frac{23.75 \times 0.65}{760 - 23.75} \times V_{air}$$

La tension de vapeur d'eau à 25°C est égale à 23.75 mmHg compte tenu de l'humidité 65%, la teneur en eau dans l'air est :

- a) Sans excès d'air : $V_{H_2O} = 24.93 \text{ Nm}^3/\text{h}$
- b) Avec excès d'air : $V_{H_2O} = 29.92 \text{ Nm}^3/\text{h}$

IV.8 LES QUANTITES DES PRODUITS DE LA COMBUSTION (COMPOSITION DES FUMÉES)

Les fumées sont composées de:

- CO₂ (produit + composant du gaz combustible)
- H₂O (produit + constituant d'air)
- N₂ (constituant du gaz combustible et de l'air).

IV.8.1 Composition de fumées théorique :

Les volumes des constituants CO₂, H₂O, N₂ sont déjà calculés selon l'équation stœchiométrique dans le tableau précédent pour 100 Nm³ de gaz combustible.

- La quantité dioxyde de carbone totale :

$$V_{CO_2}(\text{fumées}) = V_{CO_2}(\text{généralé par la combustion}) + V_{CO_2}(\text{combustible})$$

Etude énergétique du four (partie calculée)

$$V_{\text{CO}_2} (\text{fumées}) = 134.62 + 0.17 = 134.79 \text{ Nm}^3$$

- La quantité d'eau (H₂O) totale:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} (\text{fumées}) = V_{\text{H}_2\text{O}} (\text{générée par la combustion}) + V_{\text{H}_2\text{O}} (\text{air de combustion})$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} (\text{fumées}) = 230.28 + 24.93 = 255.21 \text{ Nm}^3$$

- La quantité d'azote totale:

$$V_{\text{N}_2} (\text{fumées}) = 0.79L_T + V_{\text{N}_2} (\text{combustible})$$

$$V_{\text{N}_2} (\text{fumées}) = 0.79 \times 1189.28 + 3.98 = 943.51 \text{ Nm}^3$$

La composition théorique totale des fumées sont récapitulés dans le tableau IV.6 suivant :

Constituants	V (Nm ³ /100Nm ³ de combustible)	% vol
CO ₂	134.79	10.10
H ₂ O	255.21	19.13
N ₂	943.51	70.75
Total	1333.51	100

Tableau IV.6 : La composition théorique totale des fumées

IV.8.2 Composition de fumées réelle

En tenant compte de l'O₂ et N₂ et H₂O se trouvant dans les fumées provenant de l'excès d'air :

Si on désigne par y la quantité d'oxygène dans les fumées, la quantité totale d'O₂ est

$$O_2 = O_2 \text{ consommé} + O_2 \text{ dans les fumées}$$

Etude énergétique du four (partie calculé)

$$O_2 = 249.75 + y$$

$$- VO_2' \text{ (fumées)} = y \text{ (selon les tableaux des données)}$$

$$- VN_2' \text{ (fumées)} = VN_2 \text{ (fumées théoriques)} + \frac{79}{21} y$$

$$- VH_2O' \text{ (fumées)} = VH_2O \text{ (fumées théoriques)} + 0.02 \times \frac{100}{21} y$$

$$- \text{Vair de combustion réelle} = \frac{100}{21} [VO_2 \text{ (théorique)} + y]$$

$$\text{Ou : } L_p = L_T + \alpha \times L_T = L_T (1+0.2)$$

Les valeurs des constituants des fumées de la combustion réelle de 100 Nm³ de gaz combustible, en fonction de y, sont rassemblées dans suivant

Constituants	V (Nm ³ /100Nm ³ de combustible)
O ₂	Y
CO ₂	134.79
H ₂ O	255.21+ 0.1 y
N ₂	943.51 + 3.76 y
Total	1333.51+ 4.86 y

Tableau IV.7 : les valeurs des constituants des fumées de la combustion réelle de 100Nm³ de gaz combustible.

La composition réelle des fumées dans les trois fours avec les différentes teneures en O₂ sont données dans les tableaux ci-après.

Etude énergétique du four (partie calcule)

<i>Four F101 (Rebouilleur de la colonne de préfractionnement T101)</i>				
Constituants	Avec préchauffeur		Sans préchauffeur	
	V (Nm ³)	% Vol	V (Nm ³)	% Vol
O ₂	61.36	3.76	48.68	3.10
CO ₂	134.79	8.25	134.79	8.58
H ₂ O	261.61	16.03	260.34	16.57
N ₂	1175.23	72.01	1126.54	71.73
Total	1631.98	100	1570.36	100

Tableau IV.8 : La composition réelle des fumées dans le four F101

<i>Four F102 (préchauffeur de la colonne de distillation atmosphérique T102)</i>				
Constituants	Avec préchauffeur		Sans préchauffeur	
	V (Nm ³)	% Vol	V (Nm ³)	% Vol
O ₂	43.22	2.80	50.54	3.20
CO ₂	134.79	8.73	134.79	8.53
H ₂ O	259.80	16.83	260.53	16.49
N ₂	1106.01	71.65	1133.54	71.77
Total	1543.82	100	1579.40	100

Tableau IV.9 : La composition réelle des fumées dans le four F102

Etude énergétique du four (partie calcule)

<i>Four F103 (Rebouilleur de la colonne de distillation atmosphérique T103)</i>				
	Avec préchauffeur		Sans préchauffeur	
Constituants	V (Nm ³)	% Vol	V (Nm ³)	% Vol
O ₂	68.35	4.01	48.68	3.10
CO ₂	134.79	7.90	134.79	8.58
H ₂ O	262.31	15.38	260.34	16.57
N ₂	1200.50	70.43	1126.54	71.73
Total	1665.96	100	1570.36	100

Tableau IV.10 : La composition réelle des fumées dans le four F103

IV.9 POUVOIR CALORIFIQUE INFÉRIEUR (PCI) DES CONSTITUANTS DU GAZ COMBUSTIBLE

Constituants	Formule chimique	% Volumique (y_i)	PCI (Kcal/Nm³)
Méthane	CH ₄	78.23	8554.46
Ethane	C ₂ H ₆	6.45	15323.66
Propane	C ₃ H ₈	1.98	21795.98
Butène	C ₄ H ₈	0.19	27120.98
Iso-butane	iC ₄ H ₁₀	1.14	28294.64
n-butane	nC ₄ H ₁₀	7.07	28268.30
Iso-pentane	iC ₅ H ₁₂	0.32	34893.30

Etude énergétique du four (partie calculée)

n-pentane	nC ₅ H ₁₂	0.47	34776.79
Dioxyde de carbone	CO ₂	0.17	0
Azote	N ₂	3.98	0

Tableau IV.11 : Pouvoir calorifique inférieur (PCI) des constituants du gaz combustible

IV.9.1 Estimation du PCI du mélange gaz combustible

$$PCI = \sum_i^n PCI_i \times y_i / 100 \quad (IV.7)$$

Application numérique : PCI (gaz combustible) = 10759.85 kcal/Nm³

IV.9.2 Quantité de chaleur libérée par la combustion (Q fournie)

Soit :

V_c : débit du gaz combustible en Nm³/h

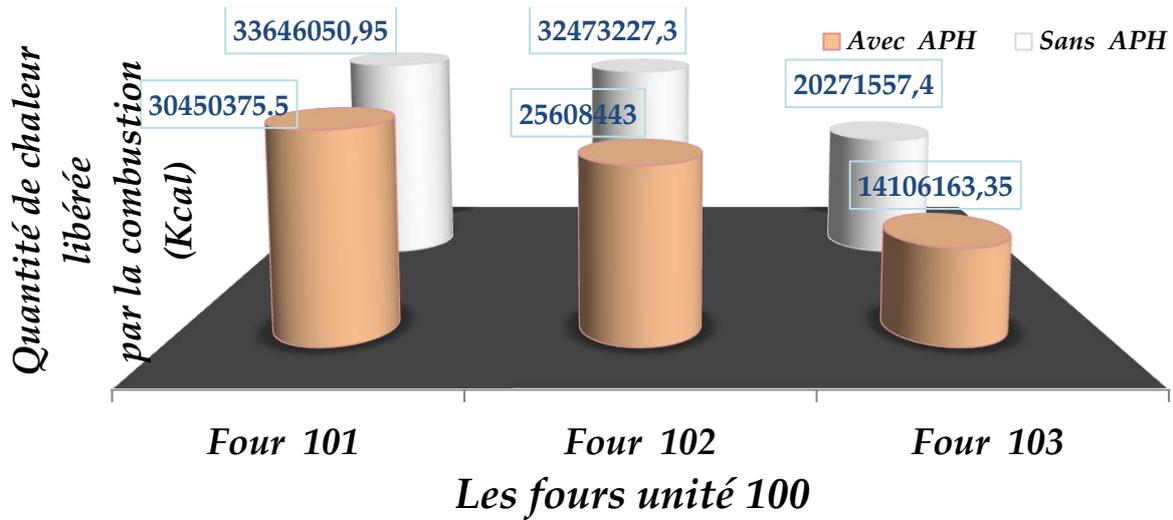
PCI : pouvoir calorifique inférieur du gaz combustible en kcal/Nm³

$$Q_{fournie} = V_c \times PCI \text{ (kcal/h)} \quad (IV.8)$$

Fours	<i>Q fournie = V_c x PCI (kcal/h)</i>	
	Avec préchauffeur d'air	Sans préchauffeur d'air
100-F-101	30450375.5	33646050.95
100-F-102	25608443	32473227.3
100-F-103	14106163.35	20271557.4

Tableau IV.12 : Quantité de chaleur libérée par la combustion dans les trois fours avec et sans APH.

Etude énergétique du four (partie calcule)



Graphe IV.1 : Quantité de chaleur libérée par la combustion dans les trois fours avec et sans APH.

IV.10 BILAN THERMIQUE DES FOURS F101, F102, F103

Le calcul du rendement est fait pour trois fours tubulaires cylindriques, il permet de détecter s'il ya un encrassement dans les tubes ainsi leur état de surface dépendant de la qualité de combustion dont elle influe sur l'état des brûleurs surtout cas de la présence des imbrulés et leur effet sur la forme de la flamme (hauteur, couleur ...etc.)

Il existe deux méthodes de calcul direct et indirect. La 1 ère est basée sur la détermination de la quantité de chaleur fournie par la combustion et celle absorbée par le fluide de procédé. La 2eme est plus précise car elle tient compte des pertes de chaleurs par parois et par fumées donc la chaleur fournie n'est pas totalement absorbée par le fluide de procédé.

IV.10.1 Calcul de la chaleur dégagée par l'air $Q_{s\ air}$

$$Q_{s\ air} = m_{air} \times CP_{air} \times T_{air} \quad (IV.9)$$

Etude énergétique du four (partie calcul)

Avec :

Q_{air} : Chaleur sensible de l'air humide 65% à l'entrée du four (Kcal)

m_{air} : Masse de l'air humide 65% (Kg)

T_{air} : Température d'entrée de l'air dans le four (°C)

$C_{p \text{ air}}$: Capacité calorifique de l'air (kcal/kmole.°C)

$m_{\text{air}} = \text{la masse volumique de l'air humide 65\%} \times \text{le débit volumique de l'air.}$

$$\rho_{\text{air}} = \frac{1}{R_a \times T_{\text{air}}} \left[P - \left(\frac{\alpha}{100} \times e_w(T_{\text{air}}) \times U \right) \right] \quad (\text{IV.10})$$

$P = \text{pression partiel d'air} + \text{pression de la vapeur d'eau}$

Avec :

ρ_{air} : la masse volumique de l'air humide 65%

R_a : constante de l'équation d'état d'air

T_{air} : la température d'entrée de l'air dans le four (°C)

P : la pression totale (Pa)

$e_w(T_{\text{air}})$: la pression de la vapeur saturante en fonction de T .

U : l'humidité relative (%)

$\alpha = 0.378$ (constante dépend de R_a)

La masse volumique de l'air humide 65% à 25°C est 1.18 kg/m³

Etude énergétique du four (partie calcule)

Le débit volumique de l'air est :

Exemple de calcul de débit volumique de l'air (cas du 1^{er} four avec APH) :

100 Nm³/h de combustible  1427.14 Nm³/h de l'air

2830Nm³ /h de combustible  X

Le débit volumique réel de l'air introduit dans le four est 40388.062 Nm³/h

Les résultats sont rapportés dans le tableau suivant :

Fours	Le débit volumique réel de l'air (Nm ³ /h)	
	Avec préchauffeur d'air	Sans préchauffeur d'air
100-F-101	40388.062	44626.667
100-F-102	33965.932	43071.085
100-F-103	18709.805	26887.317

Tableau IV.13 : Le débit volumique réel de l'air introduit dans les trois fours avec et sans APH.

La masse de l'air est calculée par cette formule : $M_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} \times V_{\text{air}}$ (IV.10)

Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

Fours	$m_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} \times V_{\text{air}}$ (kg)	
	Avec préchauffeur d'air	Sans préchauffeur d'air
100-F-101	47657.913	52659.467
100-F-102	40079.799	50823.880
100-F-103	22077.569	31727.034

Tableau IV.14 : La masse de l'air pour les trois fours avec et sans APH.

Etude énergétique du four (partie calcule)

La capacité calorifique de l'air :

$C_p \text{ air} = 0.24004 \text{ Kcal/ kg} \cdot \text{k}$ (pour l'air sec $U = 0\%$)

$C_p \text{ air} = 0.24601 \text{ Kcal/ kg} \cdot \text{k}$ (pour l'air humide $U = 100\%$)

Par interpolation linéaire la $C_p \text{ air}$ pour $U = 65\%$ est 0.2441 Kcal/kg.k

La température de l'air à l'admission des brûlures avec APH est : 251°C

La température de l'air à l'admission des brûleurs sans APH est : 17°C

La chaleur sensible de l'air pour chaque cas est récapitulée dans le tableau suivant :

Fours	<i>$Q_{S.air} = m_{air} \times C_{Pair} \times T_{air} \text{ (Kcal/h)}$</i>	
	Avec préchauffeur d'air	Sans préchauffeur d'air
100-F-101	6095847.399	3727711.009
100-F-102	5126543.059	3597771.641
100-F-103	2823906.526	2245925.009

Tableau IV.15 : La chaleur sensible de l'air pour les trois fours avec et sans APH.

La chaleur totale libérée par le gaz combustible et l'air est donnée par cette formule :

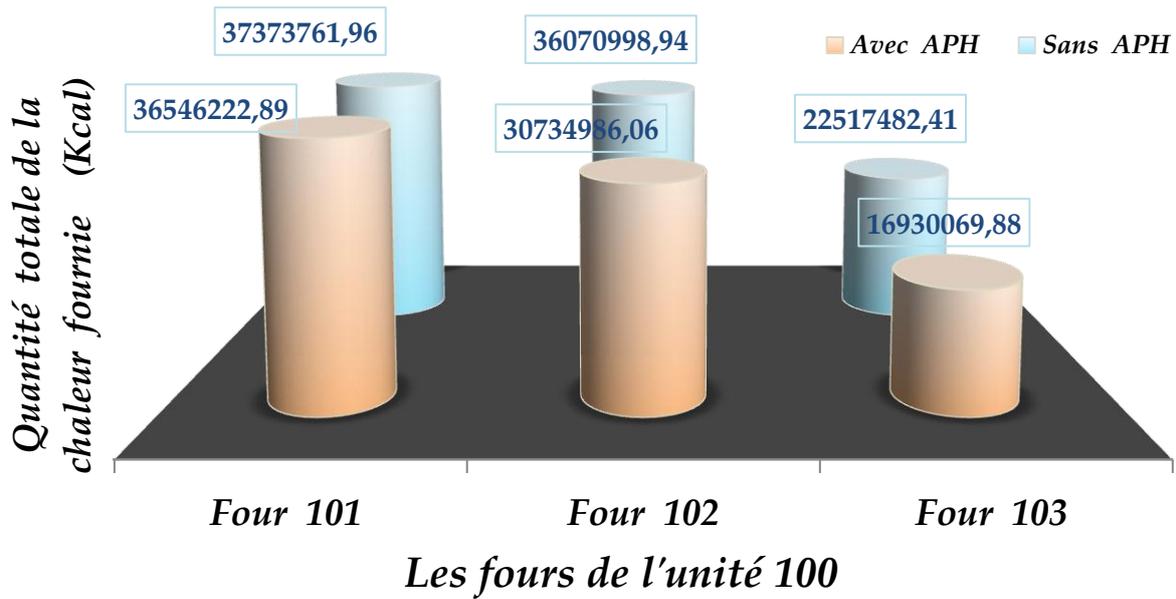
$$Q_t = Q_{S.air} + Q_{fournie}$$

Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

Fours	<i>La quantité totale de la chaleur fournie (Kcal/h)</i>	
	Avec préchauffeur d'air	Sans préchauffeur d'air
100-F-101	36546222.899	37373761.959
100-F-102	30734986.059	36070998.941
100-F-103	16930069.876	22517482.409

Tableau IV.16 : La quantité totale de la chaleur fournie par l'air et le gaz combustible pour chaque four.

Etude énergétique du four (partie calculé)



Grphe IV.2 : La quantité totale de la chaleur fournie par l'air et le gaz combustible pour chaque four.

IV.10.2 Calcul des pertes de chaleur par fumées

Les pertes les plus importantes sont les pertes à la cheminée, dissipées à l'atmosphère par les fumées qui sortant du four à une température assez élevée, elle représente 5 à 20% de la quantité totale.

$$Q_{\text{fumées}} = n_{\text{fumées}} \times H_{\text{fumées}} \quad (\text{IV.11})$$

$$H_{\text{fumées}} = C_{p\text{moy}} (T_f - 0) \quad (\text{IV.12})$$

$$C_{p\text{moy}} = \sum_i^n C_{pi} \times y_i / 100$$

Avec:

$n_{\text{fumées}}$: débit molaire des fumées (kmoles /h).

$H_{\text{fumées}}$: enthalpie des fumées (kcal /kmoles)

$C_{p\text{moy}}$: chaleur spécifique moyenne des fumées (kcal /kmole .°C)

Etude énergétique du four (partie calcule)

T_f : température de rejet des fumées

La température de référence considérée dans notre calcul est de 0 °C.

C_{pi} : chaleur spécifique du constituant i

y_i : % molaire (égal au % volumique) du constituant i dans les fumées

La chaleur spécifique de chaque constituant dépend de la température. Dans le calcul, nous avons utilisé le tableau de la chaleur spécifique moyenne entre 0 et T (°C) en kcal/kmole.°C (Annexe B) puis faire des interpolations linéaires pour trouver les valeurs aux températures de rejets de fumées avec et sans préchauffeur.

Exemple de calcul de débit molaire des fumées (cas du 1^{er} four avec préchauffeur d'air) :

100 Nm³ de combustible  1631.98 Nm³ de fumées dégagées

2830Nm³ de combustible  X

Le débit volumique réel des fumées dégagées pour ce cas est 46185.034 Nm³/h

Le débit molaire est $n = \frac{46185.034}{22.4} = 2061.831$ kmoles/h

Les résultats sont récapitulés dans les trois tableaux correspondants aux trois fours :

100-F-101 (Avec préchauffeur d'air)			
Chaleur spécifique moyenne des fumées (C _{p moy})			
Constituants	C _{pi} (kcal/kmol.°C)	y _i	C _{pi} . y _i /100
CO ₂	9.46	8.25	0.780
H ₂ O	8.08	16.03	1.295
O ₂	7.12	3.76	0.267

Etude énergétique du four (partie calcule)

N ₂	6.99	72.01	5.033
Cp _{moy} (kcal/kmol. °C)			7.375
Quantité de chaleur perdue par les fumées (Q _{fumées})			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			163
Débit de gaz combustible (Nm ³ /h)			2830
Débit des fumées (kmoles/h)			2061.831
Q _{fumées} (kcal/h)			2478579.64

Tableau IV.17 : les pertes de chaleur par fumées dans le four 101 avec APH.

100-F-101 (sans préchauffeur d'air)			
Chaleur spécifique moyenne des fumées (Cp _{moy})			
Constituants	Cp _i (kcal/kmol.°C)	y _i	Cp _i . y _i /100
CO ₂	10.4	8.58	0.892
H ₂ O	8.34	16.57	1.381
O ₂	7.38	3.10	0.228
N ₂	7.09	71.73	5.085
Cp _{moy} (kcal/kmol. °C)			7.588
Quantité de chaleur perdue par les fumées (Q _{fumées})			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			407
Débit de gaz combustible (Nm ³ /h)			3127
Débit des fumées (kmoles/h)			2192.19
Q _{fumées} (kcal/h)			6770672.419

Tableau IV.18 : les pertes de chaleur par fumées dans le four 101 sans APH.

Etude énergétique du four (partie calcule)

100-F-102 (Avec préchauffeur d'air)			
Chaleur spécifique moyenne des fumées ($C_{p \text{ moy}}$)			
Constituants	C_{p_i} (kcal/kmol.°C)	y_i	$C_{p_i} \cdot y_i/100$
CO ₂	9.46	8.73	0.8258
H ₂ O	8.08	16.83	1.3598
O ₂	7.12	2.80	0.1993
N ₂	6.99	71.65	5.0083
$C_{p \text{ moy}}$ (kcal/kmol. °C)			7.3932
Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{\text{fumées}}$)			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			163
Débit de gaz combustible (Nm ³ /h)			2380
Débit des fumées (kmoles/h)			1640.308
$Q_{\text{fumées}}$ (kcal/h)			1976722.296

Tableau IV.19 : les pertes de chaleur par fumées dans le four 102 avec APH.

100-F-102 (Sans préchauffeur d'air)			
Chaleur spécifique moyenne des fumées ($C_{p \text{ moy}}$)			
Constituants	C_{p_i} (kcal/kmol.°C)	y_i	$C_{p_i} \cdot y_i/100$
CO ₂	10.4	8.53	0.8871
H ₂ O	8.34	16.49	1.3752
O ₂	7.38	3.20	0.2361
N ₂	7.09	71.77	5.0884

Etude énergétique du four (partie calcule)

$C_{p \text{ moy}}$ (kcal/kmol. °C)	7.5868
Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{\text{fumées}}$)	
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)	407
Débit de gaz combustible (Nm ³ /h)	3018
Débit des fumées (kmoles/h)	2127.95
$Q_{\text{fumées}}$ (kcal/h)	6570742.741

Tableau IV.20 : les pertes de chaleur par fumées dans le four 102 sans APH.

100-F-103 (Avec préchauffeur d'air)			
Chaleur spécifique moyenne des fumées ($C_{p \text{ moy}}$)			
Constituants	C_{p_i} (kcal/kmol.°C)	y_i	$C_{p_i} \cdot y_i/100$
CO ₂	9.46	7.90	0.747
H ₂ O	8.08	15.38	1.242
O ₂	7.12	4.01	0.285
N ₂	6.99	70.43	4.923
$C_{p \text{ moy}}$ (kcal/kmol. °C)			7.197
Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{\text{fumées}}$)			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			163
Débit de gaz combustible (Nm ³ /h)			1311
Débit des fumées (kmoles/h)			975.032
$Q_{\text{fumées}}$ (kcal/h)			1143821.749

Tableau IV.21 : les pertes de chaleur par fumées dans le four 103 avec APH.

Etude énergétique du four (partie calcule)

100-F-103 (Sans préchauffeur d'air)			
Chaleur spécifique moyenne des fumées ($C_{p \text{ moy}}$)			
Constituants	C_{p_i} (kcal/kmol.°C)	y_i	$C_{p_i} \cdot y_i/100$
CO ₂	10.4	8.58	0.892
H ₂ O	8.34	16.57	1.381
O ₂	7.38	3.10	0.228
N ₂	7.09	71.73	5.085
$C_{p \text{ moy}}$ (kcal/kmol. °C)			7.375
Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{\text{fumées}}$)			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			407
Débit de gaz combustible (Nm ³ /h)			1884
Débit des fumées (kmoles/h)			1320.784
$Q_{\text{fumées}}$ (kcal/h)			3964501.061

Tableau IV.22 : les pertes de chaleur par fumées dans le four 103 sans APH.

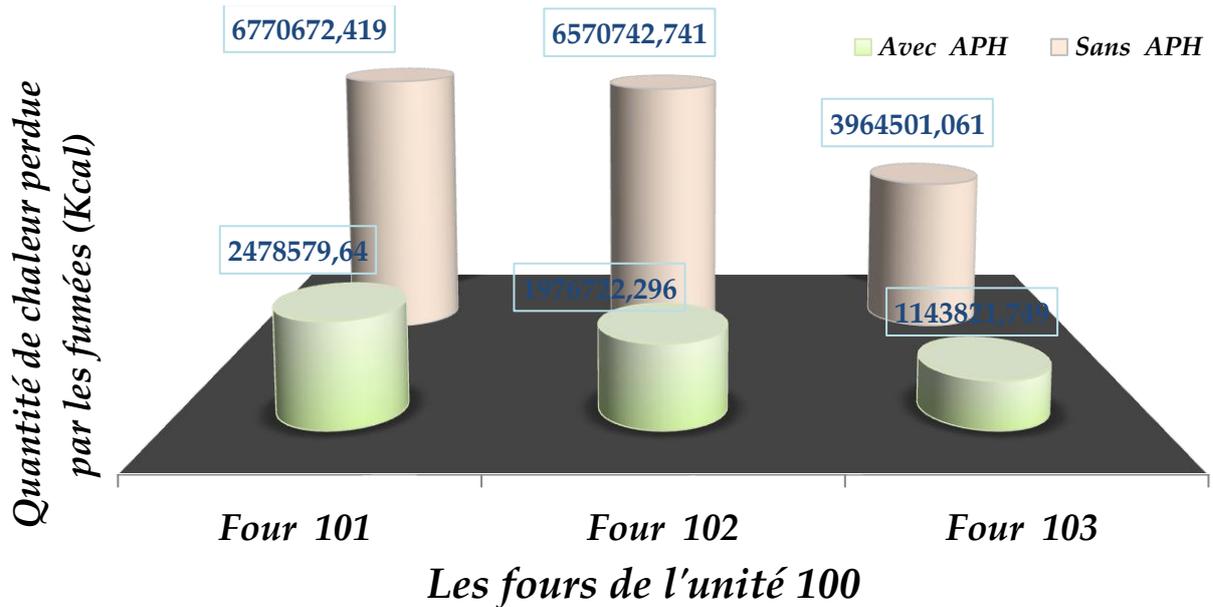
Tableau récapitulatif des quantités de chaleur perdues par les fumées dans les trois fours avec et sans APH :

Fours	$Q_{\text{fumées}}$ (Kcal)	
	Avec préchauffeur d'air	Sans préchauffeur d'air
100-F-101	2478579.64	6770672.419
100-F-102	1976722.296	6570742.741

Etude énergétique du four (partie calcule)

100-F-103	1143821.749	3964501.061
------------------	-------------	-------------

Tableau IV.23 : les quantités de chaleur perdues par les fumées dans les trois fours avec et sans APH.



Graph IV.3 : les quantités de chaleur perdues par les fumées dans les trois fours avec et sans APH.

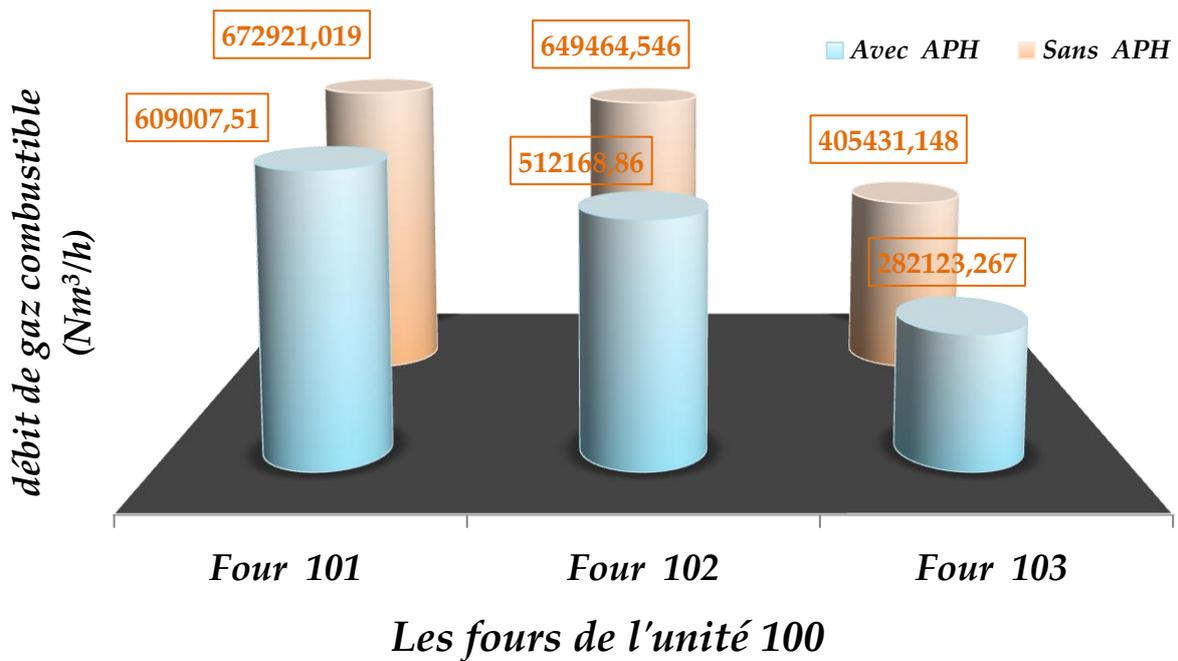
IV.10.3 Estimation des pertes de chaleur par les parois

Les fours du complexe topping condensât sont récents, par conséquent, les matériaux d'isolation thermique (briques réfractaires) sont en bon état. La quantité de chaleur perdue par les parois peut être estimée à 2% de la quantité de chaleur libérée par la combustion et nous l'avons mentionné au début. Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

Etude énergétique du four (partie calcule)

Fours	Q _{parois} = 2 % Q _{fournie} (kcal/h)	
	Avec préchauffeur d'air	Sans préchauffeur d'air
100-F-101	609007.51	672921.019
100-F-102	512168.86	649464.546
100-F-103	282123.267	405431.148

Tableau IV.24 : les pertes de chaleurs par les parois avec et sans l'APH dans les trois fours.



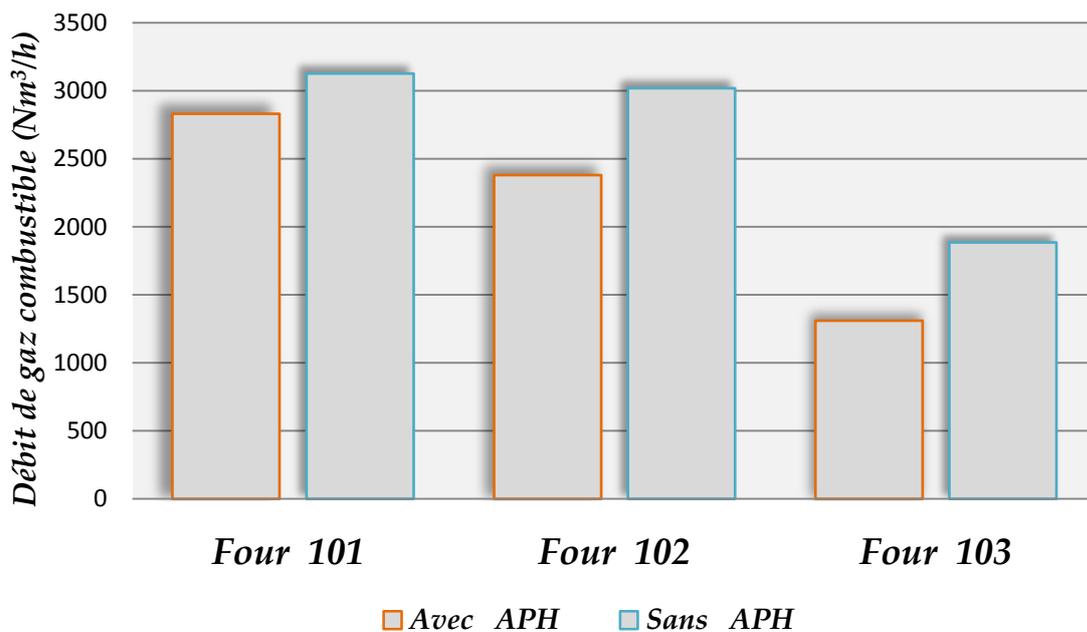
Graphe IV.4 : les pertes de chaleurs par les parois avec et sans l'APH dans les trois fours.

Tableau récapitulatif des quantités de fuel gaz consommé avec et sans APH dans les trois fours :

Etude énergétique du four (partie calcule)

Fours	Débit de gaz combustible (Nm ³ /h)	
	Avec préchauffeur d'air	Sans préchauffeur d'air
100-F-101	2830	3127
100-F-102	2380	3018
100-F-103	1311	1884

Tableau IV.25 : les quantités de fuel gaz consommé avec et sans APH dans les trois fours.



Graphe IV.5 : les quantités de fuel gaz consommé avec et sans APH dans les trois fours.

Etude énergétique du four (partie calcul)

Interprétation des résultats :

D'après les tableaux précédents et le graphe ci-dessus on remarque que :

- 1) La quantité de la chaleur libérée par la combustion lors de fonctionnement de l'APH est réduite par rapport au cas d'arrêt cela est due au débit de gaz combustible réduit dans le 1^{er} cas.
- 2) La quantité de chaleur libérée par l'air cas de son préchauffement c'est-à-dire présence de l'APH est beaucoup plus élevée que lors de son arrêt.
- 3) La quantité totale de la chaleur libérée avec l'absence de l'APH est légèrement élevée, cette différence peut être expliquée par le débit élevé de gaz combustible utilisé lors de l'absence de l'APH ayant un pouvoir calorifique assez élevé par contre dans l'autre cas le débit est réduit et l'air préchauffé contribue largement à la quantité de la chaleur libérée et non le gaz combustible seulement.
- 4) La différence de la quantité de chaleur perdue par les fumées dans les fours est notable lors du fonctionnement de l'APH et son arrêt. La quantité est réduite avec l'APH.
- 5) La quantité consommée de gaz combustible dans les trois fours est moins élevée lors du fonctionnement de l'APH.
- 6) Les pertes de chaleur par parois sont réduites lors de la présence de l'APH.

IV.10.4 Calcul du rendement thermique dans les trois fours de l'unité 100

La méthode expliquée précédemment est :

$$\eta(\%) = \frac{Q_{fournie} - (Q_{fumées} + Q_{parois})}{Q_{fournie}} \times 100$$

Etude énergétique du four (partie calcule)

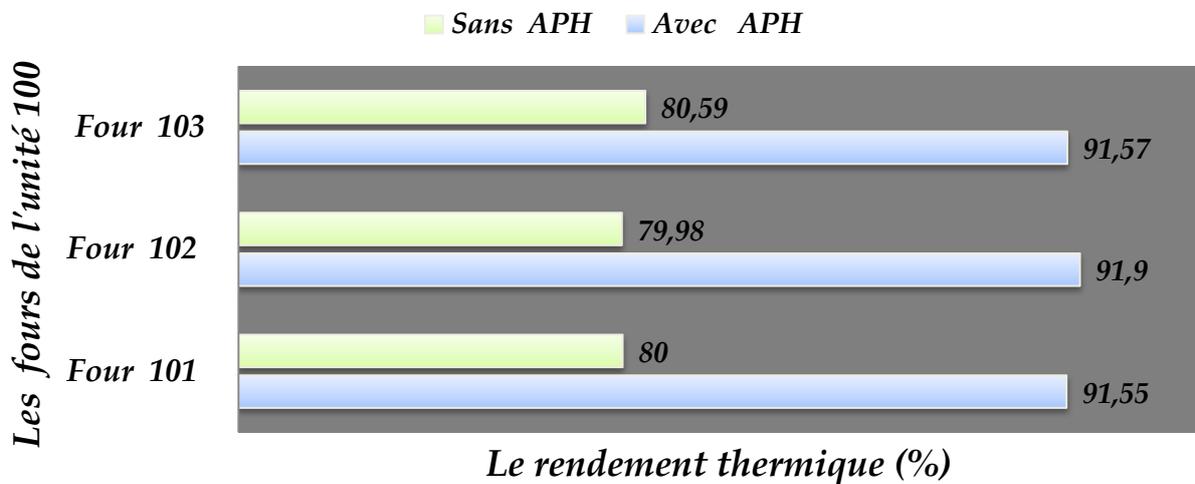
Exemple de calcul pour **100-F-101** avec APH :

$$\eta(\%) = \frac{36546222.899 - (2478579.64 + 609007.51)}{36546222.899} \times 100 = 91.55\%$$

Les résultats sont rapportés dans le tableau suivant :

Fours	<i>Le rendement thermique (%)</i>	
	Avec préchauffeur d'air	Sans préchauffeur d'air
100-F-101	91.55	80
100-F-102	91.90	79.98
100-F-103	91.57	80.59

Tableau IV.26 : le rendement thermique dans les trois fours avec et sans APH.



Graph IV.6 : le rendement thermique dans les trois fours avec et sans APH.

Interprétation des résultats :

La récupération de l'énergie perdue par les fumées (5 à 20% de la chaleur fournie par la combustion) par l'installation de l'APH a permis d'augmenter le

Etude énergétique du four (partie calculée)

rendement thermique des fours de 80 % à 91% ce qui a réduit la température des rejets des fumées et augmenter celle de l'admission de l'air dans les fours.

Théoriquement l'abaissement de la température de rejets des fumées de 20°C correspond à un gain de rendement de 1%, le gain réel dans les trois fours est rapporté dans le tableau suivant :

Les fours	Abaissement de T (°C)	Gain théorique (%)	Gain pratique (%)
100-F-101	244	12.2	11.55
100-F-102	244	12.2	11.92
100-F-103	244	12.2	10.98

Tableau IV.27 : le gain réel dans les trois fours

Une différence notable de 244°C dans la température de rejets des fumées lors du fonctionnement de l'APH et un gain important dans le rendement des fours (11%).

Etude énergétique du four (partie calcule)

Partie 02

IV.11 ETUDE TECHNICO-ECONOMIQUE LORS DE L'EMPLACEMENT DE L'APH & GAIN ENERGETIQUE

D'après les résultats de calcul, la différence entre la consommation du combustible (ΔV_v) avec et sans préchauffeur d'air est : $\Delta V_v = V_{vs} - V_{va}$ (IV.13)

V_{va} : débit du combustible consommé par les trois fours fonctionnant avec APH.

V_{vs} : débit du combustible consommé par les trois fours fonctionnant sans APH.

Calculons les débits de combustibles consommés par les trois fours

a) les trois fours fonctionnant avec APH

$$V_{va} = 2830 + 2380 + 1311$$

$$V_{va} = 6521 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

b) les trois fours fonctionnant sans APH

$$V_{vs} = 3127 + 3018 + 1884$$

$$V_{vs} = 8029 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Nous avons :

$$V_{va} = 6521 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$V_{vs} = 8029 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

A partir de l'équation (4.39) nous calculons ΔV_v :

$$\Delta V_v = 8029 - 6521$$

$$\Delta V_v = 1508 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Alors nous calculons ΔV_v pour un an :

$$\Delta V_v = 1508 \times 24 \times 365$$

Etude énergétique du four (partie calcule)

$$\Delta V_v = 13\,210\,080 \text{ Nm}^3/\text{an}$$

$$\text{Gain de gaz combustible consommé} = 13\,210\,080 \text{ Nm}^3/\text{an}$$

La quantité d'énergie récupérée est comme suit :

$$Q \text{ récupérée} = \Delta V_v \times \text{PCI} \quad (\text{IV.14})$$

$$Q \text{ récupérée} = 13\,210\,080 \times 10759.85$$

$$Q \text{ récupérée} = 1.4214 \times 10^{11} \text{ kcal/an}$$

Dans notre APH il y a deux ventilateurs A et B de tirage fonctionnant avec de l'énergie électrique, nous avons calculé le gain de cette énergie. Pendant un mois, le ventilateur A ou B consomme environ de 250 KW/mois d'électricité.

Pour que l'APH fonctionne, les deux ventilateurs doivent travailler ensemble, donc nous allons calculer la quantité de gaz transformé en électricité utilisée pour le fonctionnement des deux ventilateurs.

La quantité totale d'électricité consommée par deux ventilateurs pendant une année est

$$M = 250 \times 2 \times 12 = 6000 \text{ KW/an} = 5256 \times 10^4 \text{ KWh}$$

Le volume de gaz combustible converti en électricité est donné par cette loi :

$$\text{La quantité d'énergie consommée en kWh} = (\text{consommation en m}^3 \text{ de gaz}) \times (\text{coefficient de conversion})$$

Le coefficient de conversion est en générale compris entre 9 et 12.5 KWh/m³ dépend de plusieurs paramètres dans ce cas on le prend pour 11.05 KW/m³ à cause de la qualité de fuel gaz ayant un grand pouvoir calorifique.

Etude énergétique du four (partie calculé)

Consommation en m³ de gaz = $5256 \times 10^4 / 11.05 = 4\,756\,561.0859$ m³ /an

Gain réel de gaz combustible consommé = 8 453 518.914

Nm³/an

Le gain réel de l'énergie est approximativement 9.1×10^{10} kcal/an est égal 3.6×10^{11} btu/an

Calcul du gain d'argent

L'Algérie est un pays exportateur de gaz naturel, on connaissant le prix actuel du gaz naturel P = 4\$ pour 10⁶ btu, on peut calculer le gain d'argent comme suit :

G = la quantité de chaleur récupérée (btu/an) × le prix d'une unité de btu (\$)

Avec :

G : le gain d'argent

P : le prix actuel du gaz naturel

Donc:

$$G = 3.6 \times 10^{11} \times 4 / 10^6 \quad G = 1.4 \text{ million } \$ / \text{ an}$$

Le gain réel = 1.4 million de \$ / an

Etude énergétique du four (partie calcule)

CONCLUSION GENERALE

Etude énergétique du four (partie calcule)

A fin de mieux comprendre l'importance de la mise en service du préchauffeur d'air dans les zones industrielles, utilisant dans ses procédés des fours gigantesques, fonctionnant à des débits élevés de gaz combustible, laissant échapper des grandes quantités des fumées vers l'atmosphère, ayant des composés polluants pour l'environnement avec des températures élevées environ 400°C . Ce problème est résolu par l'emplacement d'un échangeur de chaleur à plaque permettant l'échange de chaleur entre deux fluides : les fumées sortant de la zone de convection et l'air comme comburant avant son admission dans les bruleurs. Cet appareil est composés des pièces et des joints couteux ce qui conditionne des types des fluides assez pures pour éviter le phénomène d'encrassement, par conséquent augmenter sa durée de vie. Sachant bien que les fumées peuvent causer la corrosion par les composées acides ainsi les dépôts charbonneux conduisant à la réduction de son efficacité en diminuant la surface d'échange, ainsi le vieillissement des joins qui provoque des fuites externes, conduisant à l'endommagement de l'APH avec le temps. Ce problème est rencontré dans la zone industrielle de topping RA2K avec l'arrêt de ventilateur extracteur bien expliqué dans la problématique menant à l'isolement du préchauffeur d'air.

Pour éviter ces situations préjudiciables susceptibles de survenir, le suivie et la maintenance préventive reste les meilleurs solutions pour préserver l'appareil et économiser le prix d'achat des pièces de rechange.

Dans notre étude nous avons pu toucher à notre but basé sur la mise en évidence le gain économique, énergétique et environnemental lors du fonctionnement de l'APH que la raffinerie RA2K SKIKDA gagnera si elle assure son marché en continu dans le service.

A partir des données sur site nous avons eu des résultats concrets illustrés dans les points suivants :

- ❖ Gain réel de gaz combustible consommé = 8 453 518.914 Nm³/an
environ 25%*

Etude énergétique du four (partie calculée)

- ❖ *La réduction de la température de rejet des fumées environ 244 °C*
- ❖ *Un gain pratique des rendements thermiques des trois fours jusqu'à 91% par un pourcentage de 11%*
- ❖ *Un gain financier estimé de 1.4 million de \$ par an si ce volume de gaz combustible récupéré a été exporté.*
- ❖ *Diminution des pertes calorifique par parois dans les trois fours.*
- ❖ *Préserve de l'environnement par réduction des composés polluants tel que les NOx causant les pluies acides.*

Bibliographie

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. BP Statistical Review of World Energy, juin 2014.
2. Emilian Koller, aide-mémoire génie chimique, 2emeEd Denoud, 2005.
3. LES ÉQUIPEMENTS « LES ÉCHANGEURS » SUPPORT DE FORMATION Cours EXP-PR-EQ120 Révision 0.1 TOTAL.
4. ÉQUIPEMENT « RÉCHAUFFEURS ET FOURS » MANUEL DE FORMATION COURS EXP-PR-EQ110 Révision 0.1 TOTAL.
5. P. Wuithier, Raffinage et génie chimique, éd. Technip (1972).
6. J. P. Wauquier, Le Raffinage du Pétrole- Pétrole brut- Produits pétroliers- Schémas de fabrication, Tome I, Editions Technip, Paris, 1994.
7. Cours équipements thermiques de Mr MIMOUN, FHC, UMBB.
8. Brochure : calcul des fours tubulaires, INH, 1975.
9. Boudjadi Mohamed Amir: « Etude du Rendement Thermique des Fours avec et sans la mise en service du préchauffeur d'air (Raffinerie de Condensat RA2K) », Avril 2017.
10. SOUDANI Ala Eddine et BEGHOUR Yassine: « calcul des rendements thermique des fours tubulaire avec et sans APH et du gain d'énergie », 2020.
11. Pierre Trambouze, « Le Raffinage du pétrole - Tome 4 - Matériels et équipements », Édition Technip, Paris, 1999.

Annexes

Annexes A

Les caractéristiques principales des trois fours 100-F-101, 100-F-102 et 100-F-103 sont reportées dans les tableaux suivants

Four 100-F-101			
Service : Four rebouilleur de la colonne de préfractionnement 100-T-101			
Performances			
Charge d'exploitation	Cas max	Cas min	Cas max 115%
Fluide	Fond de colonne T101		
Chaleur absorbée (MW)	26,947	11,956	30,989
Débit (kg/s)	136	61	156,4
Facteur d'encrassement (m ² .°C/W)	0,00026	0,00026	0,00026
Encrassement admissible (mm)	1	1	1
Paramètres thermodynamique			
Température (entrée/sortie) (°C)	196/229	191/223	196/229
Pression (entrée/sortie) (bars G)	6,91/3,85	4,45/3,85	7,55/3,85
Débit liquide (entrée/sortie) (kg/s)	136/73	61/33	156,4/84
Débit vapeur (entrée/sortie) (kg/s)	-/63	-/28	-/72,4
Masse volumique (entrée/sortie) à 15°C (kg/m ³)	0,7698/0,7865	0,7722/0,7887	0,7698/0,7865
Viscosité liquide (entrée/sortie) (mPa.Sec)	0,1731/0,166	0,1763/0,17	0,1731/0,1666
Chaleur spécifique Liquide (entrée/sortie) (kJ/kg.°C)	2,8136/2,9264	2,7893/2,888	2,8136/2,9264
Chaleur spécifique Vapeur (entrée/sortie) (kJ/kg.°C)	-/2,4729	-/2,371	-/2,4729
Conductivité therm. Liquide (entrée-sortie) (W/m.°C)	0,0821/0,0752	0,0833/0,0766	0,0821/0,0752
Conductivité therm. Vap (entrée-sortie) (W/m.°C)	-/0,0323	-/0,0317	-/0,0323
Propriétés mécanique			
Type de zone	Radiation	Convection	
Pression design (bars G)	18,005	18,005	
Surépaisseur corrosion des tubes (mm)	3	3	
Pression de test hydrostatique (bars G)	35,706	35,706	
Température design métal tube (°C)	282	382	
Disposition des tubes	Verticale	Horizontale	
Diamètre extérieur des tubes (mm)	168,3	168,3	
Epaisseur des tubes (mm)	7,11	7,11	
Nombre de passes	6	6	
Nombre de tubes lisses/ailettes	72/-	36/36	
Longueur effective des tubes (m)	16,879	5,677	
S totale exposée des tubes (lisse/ailette) (m ²)	643/-	108/798	
Type de brûleurs	Bas NOx	/	
Nombre de brûleurs	10	/	

Four 100-F-102			
Service : Four de charge de la colonne de distillation atmosphérique 100-T-103			
Performances			
Charge d'exploitation	Cas max	Cas min	Cas max 115%
Fluide	Fond de la colonne T101		
Chaleur absorbée (MW)	22,154	10,142	25,477
Débit (kg/s)	83,3	45	95,79
Facteur d'encrassement (m ² °C/W)	0,00026	0,00026	0,00026
Encrassement admissible (mm)	1	1	1
Paramètres thermodynamique			
Température (entrée/sortie) (°C)	191/217	204/228	191/217
Pression (entrée/sortie) (bars G)	7,38/1,50	4,44/1,5	8,27/1,5
Débit liquide (entrée/sortie) (kg/s)	83,3/17,2	45/14,5	95,795/19,78
Débit vapeur (entrée/sortie) (kg/s)	-/66,1	-/30,5	-/76,015
Masse volumique (entrée/sortie) à 15°C (kg/m ³)	0,7722/0,8067	0,7726/0,8264	0,7722/0,8067
Viscosité Liquide (entrée/sortie) (mPa Sec)	0,1771/0,219	0,1791/0,2335	0,1771/0,219
Chaleur spécifique Liq (entrée/sortie) (kJ/kg.°C)	2,7663/2,6572	2,8528/2,815	2,7663/2,6572
Chaleur spécifique Vap (entrée/sortie) (kJ/kg.°C)	-/2,3090	-/2,492	-/2,3090
Conductivité therm. Liq (entrée-sortie) (W/m.°C)	0,0836/0,0793	0,0811/0,079	0,0836/0,0793
Conductivité therm. Vap (entrée-sortie) (W/m.°C)	-/0,0299	-/0,031	-/0,0299
Propriétés mécanique			
Type de zone	Radiation	Convection	
Code	API 530		
Pression design (bars G)	18,005	18,005	
Surepaisseur corrosion des tubes (mm)	3/3	3/3	
Pression de test hydrostatique (bars G)	38,255	38,255	
Température design métal tube (°C)	390	390	
Disposition des tubes	Verticale	Horizontale	
Diamètre extérieur des tubes (mm)	168,3	168,3	
Épaisseur des tubes (mm)	7,11	7,11	
Nombre de passes	4	4	
Nombre de tubes lisse/ailette	64/-	24/24	
Longueur effective des tubes (m)	16,079	5,677	
Surface exposée des tubes (lisse/ailette) (m ²)	544/-	72/697	
Type de brûleurs	Bas NOx	/	
Nombre de brûleurs	8	/	

Four 100-F-103			
Service : Four rebouilleur de la colonne de distillation atmosphérique 100-T-103			
Performances			
Charge d'exploitation	Cas max	Cas min	Cas max 115%
Fluide	Fond de la colonne T103		
Chaleur absorbée (MW)	30,239	15,119	34,774
Débit (kg/s)	309	99	355,35
Facteur d'encrassement (m ² °C/W)	0,00044	0,00044	0,00044
Encrassement admissible (mm)	1	1	1
Paramètres thermodynamique			
Température (entrée/sortie) (°C)	355/365	364/370	355/365
Pression (entrée/sortie) (bars G)	4,96/1,3	2,31/1,3	6,13/1,3
Débit liquide (entrée/sortie) (kg/s)	309/181	99/55	355,35/208,15
Débit vapeur (entrée/sortie) (kg/s)	-/128	-/44	-/147,2
Masse volumique (entrée/sortie) à 15°C (kg/m ³)	0,8372/0,8383	0,8291/0,8323	0,8372/0,8383
Viscosité Liquide (entrée/sortie) (mPa Sec)	0,1685/0,159	0,1792/0,01	0,1685/0,159
Chaleur spécifique Liq (entrée/sortie) (kJ/kg.°C)	3,41/3,449	3,4234/3,536	3,41/3,449
Chaleur spécifique Vap (entrée/sortie) (kJ/kg.°C)	-/2,949	-/2,984	-/2,949
Conductivité therm. Liq (entrée-sortie) (W/m.°C)	0,0605/0,0576	0,0613/0,0568	0,0605/0,0576
Conductivité therm. Vap (entrée-sortie) (W/m.°C)	-/0,0341	-/0,0355	-/0,0341
Propriétés mécanique			
Type de zone	Radiation	Convection	
Pression design (bars G)	15,396	15,396	
Surépaisseur corrosion des tubes (mm)	3/3	3/3	
Pression de test hydrostatique (bars G)	46,758	46,758	
Température design métal tube (°C)	492	492	
Disposition des tubes	Verticale	Horizontale	
Nuance tubes	P 335 P5	P 335 P5	
Diamètre extérieur des tubes (mm)	168,3	168,3	
Epaisseur des tubes (mm)	7,11	7,11	
Nombre de passes	8	8	
Nombre de tubes lisse/ailette	80/-	24/72	
Longueur effective des tubes (m)	16,901	7,733	
Surface total exposé des tubes (lisse/ailette) (m ²)	714/-	98/3651	
Type de brûleurs	Bas NOx	/	
Nombre de brûleurs	10	/	

Annexes B

CHALEUR SPÉCIFIQUE MOYENNE ENTRE 0°C ET t°C en kcal (°C)⁻¹ (k.mole)⁻¹

t°C	H ₂	N ₂	O ₂	CO	H ₂ O _v	CO ₂
100	6,92	6,97	7,05	6,97	8,03	9,17
200	6,95	7,00	7,15	7,00	8,12	9,65
300	6,97	7,04	7,26	7,06	8,22	10,06
400	6,98	7,09	7,38	7,12	8,34	10,40
500	6,99	7,15	7,49	7,19	8,47	10,75
600	7,01	7,21	7,59	7,27	8,60	11,03
700	7,03	7,27	7,68	7,34	8,74	11,28
800	7,06	7,35	7,77	7,43	8,89	11,50
900	7,09	7,42	7,85	7,50	9,04	11,70
1 000	7,12	7,49	7,92	7,57	9,18	11,88
1 100	7,15	7,56	7,98	7,64	9,32	12,05
1 200	7,20	7,62	8,04	7,70	9,45	12,19
1 300	7,24	7,67	8,11	7,76	9,58	12,32
1 400	7,28	7,73	8,16	7,81	9,72	12,45
1 500	7,32	7,78	8,20	7,85	9,84	12,56
1 600	7,36	7,82	8,24	7,90	9,96	12,66
1 700	7,40	7,86	8,28	7,94	10,09	12,75
1 800	7,45	7,91	8,33	7,98	10,20	12,84
1 900	7,49	7,94	8,38	8,02	10,30	12,92
2 000	7,53	7,98	8,42	8,05	10,41	12,99
2 100	7,57	8,01	8,45	8,09	10,52	13,06
2 200	7,62	8,05	8,48	8,12	10,61	13,13
2 300	7,66	8,08	8,52	8,15	10,71	13,19
2 400	7,70	8,10	8,56	8,18	10,79	13,24
2 500	7,74	8,14	8,59	8,21	10,87	13,30

D'après E. Justi et H. Lüder. *Forsch. Gebiete Ingenieur*, 6, 211, 1935.

Annexes C

Data sheet des fours :

propriétés	F-101	F-102	F-103
Design pressure	1800,5 KPa (g)	1800,5 KPa (g)	1539,6 KPa (g)
Design temperature	382 C ^U	390 C ^U	492 C ^U
Capacity	30 m ³	28 m ³	53 m ³
Operating fluid	Prefractionator bottom	Prefractionator bottom	Atmospheric bottom
Total weight	55000 Kg	41000 Kg	90000 Kg
Test pressure	3577,4 KPa (g)	3825,5 KPa (g)	4686,6 KPa (g)
Date of test	25/06/2008	08/06/2008	16/08/2008
Corrosion allowance	3,2 mm	3,2 mm	3,2 mm
Radiography	10 %	10 %	100 %
Heat treatment	No	No	Yes

Annexes D

Fiche techniques du Préchauffeur d'air

PURCHASER / OWNER:		CPECC		ITEM NO.:	
SERVICE:		Flue gas/air preheater		LOCATION: ALGERIA	
1	MANUFACTURER:	BY-CAST FLANDERS NV			REV.
2	MODEL:	XII-29-2658-HTB-LTB-P3 (9/2, 3/1)			
3	NUMBER REQUIRED:	1			
4	HEATING SURFACE, m ²	4489 (flue gas side)			
5	WEIGHT, kg	145200			
6	APPROX. DIMENSIONS: (H x W x L) m	7,4 x 4,65 x 2,7-1,3			
PERFORMANCE DATA					
8	OPERATING CASE	MAX CASE F 101 ONLY	MAX CASE F 102 ONLY	MAX CASE F 103 ONLY	
9					
10	AIR SIDE: flow entering, kg/h	47844	34884	42408	
11	inlet temperature, C.	25	25	25	
12	outlet temperature, C.	309	296	296	
13	pressure drop: allowable, mm H ₂ O	152 (4)	152 (4)	200 (4)	1
14	calculated, mm H ₂ O	26	15	21	2
15	heat absorbed, MW	3,891	2,702	3,366	
16	FLUE GAS SIDE: flow, kg/h	50472	36792	44784	
17	inlet temperature, C.	384	370	370	
18	outlet temperature, C.	140	137	131	
19	pressure drop: allowable, mm H ₂ O	152	152	152	
20	calculated, mm H ₂ O	30	20	25	2
21	heat exchanged, MW				
22	AIR BY-PASS, kg/h	0	0	0	
23	TOTAL AIR FLOW TO BURNERS, kg/h	47844	34884	42408	
24	MIX AIR TEMPERATURE, C.	309	296	296	
25	FLUE GAS COMPOSITION, mole% (O ₂ /N ₂ /H ₂ O/CO ₂ /SO _x)	(1)	(1)	(1)	
26	FLUE GAS SPECIFIC HEAT, kJ/kg-C	1,1463	1,1439	1,1435	2
27	FLUE GAS ACID DEW POINT TEMPERATURE, C.	57			
28	MINIMUM METAL TEMPERATURE: allowable, C.				
29	calculated, C.	109	109	104	2
MISCELLANEOUS:					
31	MINIMUM AMBIENT AIR TEMPERATURE, C.	10°C(design for heating system);mech.design temp.=47/1°C(7)			2
32	SITE ELEVATION ABOVE SEA LEVEL, m	Sea level			2
33	RELATIVE HUMIDITY min/norm/max	69/72/79 (7)			2
34	EXTERNAL COLD AIR BY-PASS (yes/no)	Yes			
35	COLD END THERMOCOUPLES (yes/no) / number required	2			
36	ACCESS DOORS: NUMBER/SIZE/LOCATION	2			
37	INSULATION (INTERNAL/EXTERNAL):	external			
38	CLEANING MEDIUM: steam of water	water			
39	pressure, kPa.g	1 to 3			
40	temperature, C.	Cold			
41 NOTES: (ALL DATA ON PER UNIT BASIS):					
42 "Max case F-101 only" means that only F-101 heater is running while F-102 and F-103 is out of service					
43 "Max case F-102 only" means that only F-102 heater is running while F-101 and F-103 is out of service					
44 "Max case F-103 only" means that only F-103 heater is running while F-101 and F-102 is out of service					
45 Vendor shall check all OPERATING CASE and he shall fix the correct by passed air flow					
46 VERY IMPORTANT: VENDOR SHALL DEFINE THE MINIMUM TEMPERATURE OF FLUE GAS THAT MAY BE USED					
47 AT AIRPREHEATER FLUE GAS OUTLET TO AVOID CORROSION DAMAGE (THIS TEMPERATURE WILL BE					
48 USED BY PERSONELL TO AVOID CORROSION PROBLEMS)					
49 (7) See doc. Basic Engineering design data SC1-900-SP-PJ-0001					
AIR PREHEATER DATA SHEET				B-4783-85-DS-2	
API STD-560				REV: C	Date: 02/08/2007 Sheet 3 of 4

CONSTRUCTION DATA					
1	I. CAST IRON:	Required by Customer			REV.
2	NUMBER OF PASSES	3			
3	NUMBER OF TUBES PER BLOCK	87	116	87+58	
4	NUMBER OF BLOCKS	1/	2/	3/4	
5	TYPE OF SURFACE	LTB	HTB	HTB	
6	TUBE MATERIAL	Gray Cast Iron DEKA			
7	TUBE OF THICKNESS, mm	5			
8	GLASS BLOCK (yes/no)	No			
9	NUMBER OF GLASS TUBES	0			
10	AIR CROSS-OVER DUCT: NUMBER	2			
11	BOLTED/WELDED	B			
12	SUPPLIED WITH CLIPS	Y			
13	WATER WASH: yes/no	Y			
14	TYPE (OFF-LINE OR ON-LINE)	OFF line			
15	LOCATION	Top			