



MÉMOIRE

BENRAMOUL ABDERRAHMANE

Étude Comparative du Rendement
Thermique des Fours de l'unité 100
Avec et Sans 'APH'

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Faculté des Sciences de l'Ingéniorat
Département : Département de Génie des Procédés
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Industries Pétrochimiques
Spécialité : Génie Pétrochimique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

**Étude Comparative du Rendement Thermique des Fours de l'unité 100
Avec et sans la mise en service du Préchauffeur d'air
(Raffinerie de Condensat RA2/K, Skikda)**

Présenté par : *BENRAMOUL Abderrahmane*

Encadrant : *SAMAR Mohamed El-Hadi Professeur Université Badji Mokhtar- Annaba*

Jury de Soutenance :

LACHGAR Mohamed Saddek	Maître Assistant (A)	Université Badji Mokhtar- Annaba	Président
SAMAR Mohamed El- Hadi	Professeur	Université Badji Mokhtar- Annaba	Encadrant
TIFOUTI Lakhdar	Professeur	Université Badji Mokhtar- Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

RESUMÉ

Les fours représentent le cœur d'une raffinerie, une défaillance de ces derniers entraîne souvent l'arrêt de production et qui dit arrêt dit perte d'argent. Par conséquent, une surveillance régulière et stricte de ces équipements est obligatoire et il faut toujours aspirer à améliorer leurs conditions opératoires afin de maintenir leurs rendements toujours élevés. Notre étude s'est focalisée sur le fonctionnement des fours F-101, F-102, F-103 du complexe RA2/K (Skikda) coupler à un préchauffeur d'air commun. L'impact de ce dernier sur les rendements des fours est primordial et entraîne un gain sûr du combustible, de l'énergie à partir des fumées et la réduction de la pollution. Le but de cette étude est de calculer les différents gains cités.

ملخص

تمثل الأفران قلب المصفاة، وفشل هذه غالباً ما يؤدي إلى وقف الإنتاج والذي يقول التوقف يقول فقدان المال. نتيجة لذلك، فإن المراقبة المستمرة والصارمة لمعداتها إلزامية ويجب الطموح الدائم إلى تحسين ظروف التشغيل الخاصة بها من أجل زيادة مردودها. ركزت دراستنا على أداء لأفران F-101, F-102, F-103 من مركب RA2/K (SKIKDA) مدجة بمسخن هواء، وتأثير هذه التكنولوجيا الجديدة على مردود الأفران و الربح المحقق (الإقتصاد في الوقود، تقليل الطاقة المفقودة في الأدخنة و تقليص التلوث).

SUMMARY

The furnaces represent the heart of a refinery. A failure of the latter often leads to the shutdown of production and who says shutdown says loss of money; therefore, a regular and strict monitoring of its equipments is mandatory and engineers must always seek to improve their operating conditions to enhance their performance. Our study focused on the operation of furnaces F-101, F-102, F-103 of the complex RA2/K (Skikda) coupled with an air preheater and the impact of this new technology on the yields of the latter and the gain obtained (saving fuel, minimizing energy loss in the fumes and reducing pollution).

REMERCIEMENTS

Louanges à **ALLAH** le tout puissant, de m'avoir béni d'endurance et de patience afin de réaliser ce modeste projet.

Avant tout je remercie **Mes Parents** que je ne remercierais jamais assez pour leur soutien inconditionnel tout au long de cette épopée, sans eux ce travail n'aurait jamais existé.

J'adresse toute ma gratitude à mon encadreur **Pr. SAMAR Mohamed El-Hadi** de l'université Badji Mokhtar Annaba pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion ainsi que toutes les connaissances acquises tout au long de mon cursus.

Je tiens à remercier spécialement **Pr. TIFOUTI Lakhdar** d'avoir accepté de juger ce mémoire et d'en être l'examineur ainsi que **M.A LACHGAR Mohamed Saddek** pour avoir accepté de juger ce travail et d'en être le président de jury.

Je désire exprimer mes profonds remerciements à **Mr. SÉRIDI Abdelhalim Sous-Directeur Exploitation** pour l'opportunité de stage ainsi que toute l'équipe du complexe **RA2/K** qui m'ont fourni les informations nécessaires à la réalisation de ce mémoire.

J'exprime ma reconnaissance à Mr. **CHETTAB Ahmed chef de service stockage et expédition** du complexe RA2/K pour son accueil chaleureux et sa bienveillance et les ingénieurs Mr. **BOUKAF Walid**, Mr. **ADJROUD Karim**, Mr. **GAIDI Faysal** et Mr. **BOUHALA Noureddine**, Mr. **AMIRI Rachid** d'avoir partagé leur savoir professionnel, Mr. **BOUGETAH Mourad Chef de Service Contrôle de Qualité** et Mr. **BOUDIS Abdeljalil Chef de Service Études** pour leur expertise et leurs conseils dans le domaine des fours industriels. Je remercie également Mr. **BOUCHAMA Fateh Chef de Service Laboratoire** et toute l'équipe du laboratoire d'analyse du complexe pour m'avoir assisté au cours des analyses.

Un grand merci à mes proches, mes amis et collègues qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche.



CONTENU

Chapitre I : Origine et description de la raffinerie de condensat RA2/K

I.	INTRODUCTION :	15
II.	SITUATION GÉOGRAPHIQUE DU COMPLEXE RA2/K :	15
III.	LES DIFFERENTES INSTALLATIONS DU COMPLEXE RA2/K :	16
IV.	FONCTIONNEMENT DE L'UNITE 100 :	17
IV.1	Les Différentes Parties De L'installation :	18
IV.2	Train De Préchauffe :	18
IV.3	La Distillation :	19
IV.4	Préfractionnement :	20
IV.5	Distillation Atmosphérique :	21
IV.6	Bilan De Matière :	22

Chapitre II : La Combustion

V.	INTRODUCTION :	25
VI.	ORIGINE ET HISTORIQUE :	25
VII.	DEFINITION :	26
VIII.	L'ASPECT CHIMIQUE D'UNE COMBUSTION :	27
VIII.1	L'oxydation Complète Du Carbone :	27
VIII.2	L'oxydation Complète De L'hydrogène :	27
VIII.3	L'oxydation Incomplète Du Carbone :	27
VIII.4	L'oxydation Du Monoxyde De Carbone :	28
IX.	TYPES DE COMBUSTION :	28
X.	CARACTERISTIQUES DE LA COMBUSTION :	29
X.1	Chaleur De Combustion :	29
X.2	Pouvoir Calorifique :	29
X.3	Pouvoir Combustible :	30
X.4	Pouvoir Fumigène :	30
X.5	L'indice De Wobbe :	30
X.6	La Flamme :	30
X.7	Excès D'air :	30
X.8	Température De Flamme :	30
XI.	ESTIMATION DU POUVOIR CALORIFIQUE D'UN MELANGE GAZEUX :	31

XII.	LES CALCULS DANS LA COMBUSTION :.....	31
XII.1	Quantité D'air Nécessaire Des Combustibles Gazeux :.....	31
XII.2	Calcul Du Volume Et De La Composition Des Fumées De Combustion :.....	33
XIII.	LES PARAMETRES DE LA COMBUSTION :.....	35
XIII.1	L'effet De L'enrichissement En Oxygène :.....	35
XIII.2	Effet De La Température Et De La Pression (Loi Des Gaz Parfaits) :.....	36
XIV.	DETERMINATION DU FACTEUR D'EXCES D'AIR REEL :.....	37

Chapitre III : Les Fours Industriels

XV.	INTRODUCTION.....	39
XVI.	ROLE D'UN FOUR.....	39
XVII.	PRINCIPAUX OBJECTIFS ET CONTRAINTES DES CONCEPTEURS ET DES OPERATEURS DE FOURS.....	39
XVIII.	DOMAINES D'UTILISATION DES FOURS	41
XVIII.1	Réchauffage D'un Fluide Sans Changement De Phase :.....	41
XVIII.2	Réchauffage D'un Fluide Avec Vaporisation Partielle :.....	41
XVIII.3	Réchauffage D'un Fluide Avec Réaction Chimique :.....	41
XIX.	DIFFERENTS TYPES DE FOURS.....	42
XIX.1	Fours Cabines A Tubes Verticaux :.....	42
XIX.2	Fours Cabines A Tubes Horizontaux :.....	42
XIX.3	Fours Cylindriques Verticaux :.....	44
XX.	TECHNOLOGIE D'UN FOUR CLASSIQUE	45
XX.1	Eléments Constitutifs D'un Four Classique :.....	46
XX.2	Zone De Radiation :.....	46
XX.3	Zone De Convection :.....	46
XX.4	Brûleurs :.....	46
XX.5	Faisceau Tubulaire :.....	47
XX.6	Charpente Métallique :.....	47
XX.7	Garnissage Réfractaire :.....	48
XX.8	Cheminée :.....	49
XX.9	Ramoneurs :.....	49
XX.10	Equipements De Chauffe :.....	49
XXI.	DIFFERENTS TYPES DES BRULEURS :.....	50
XXI.1	Classification Selon Le Combustible :.....	50

XXI.2	Classification Selon La Circulation D'air :	50
XXI.3	Surveillance Des Brûleurs :	51
XXII.	LES PRECHAUFFEURS D'AIR	52
XXII.1	Rôle Du Préchauffeur D'air :	52
XXII.2	Différents Types De Préchauffeurs D'air :	52
XXII.3	Avantages Et Inconvénients Du Préchauffage De L'air :	54
XXIII.	RENDEMENT THERMIQUE D'UN FOUR	54
XXIII.1	Définition :	54
XXIII.2	Paramètres Influant Le Rendement D'un Four :	56
XXIII.3	Possibilités Et Limites A L'amélioration Du Rendement D'un Four :	56
XXIV.	CONTROLE CONTINUE DU FOUR	58
XXV.	LES FOURS DU TOPPING CONDENSAT DE SKIKDA	60
XXV.1	Fonctionnement :	60
XXV.2	Constituants Des Fours De L'unité 100 Ils Constituent Par :	61
XXV.3	Brûleurs :	62
XXV.4	Garnissage Réfractaire	63
XXV.5	Répartition De La Charge De Chaque Four Dans Les Passes :	63
XXVI.	PRECHAUFFEUR D'AIR	63
XXVI.1	Description :	63
XXVI.2	Maintenance Du Préchauffeur D'air :	64

Chapitre IV : Calcul Du Rendement Thermique Des Fours Et Le Gain Obtenu

XXVII.	INTRODUCTION :	71
XXVIII.	FOURS DE TOPPING DU CONDENSAT :	72
XXVIII.1	Four F-101 :	72
XXVIII.2	Four F-102 :	73
XXVIII.3	Four F-103 :	73
XXVIII.4	Informations concernant le désign :	74
XXIX.	CALCULS DES RENDEMENTS THERMIQUES DES FOURS :	74
XXIX.1	Données :	75
XXIX.2	Composition du gaz combustible :	76
XXIX.3	Réactions De Combustion :	77
XXIX.4	Pouvoir calorifique inférieur (PCI) des constituants du gaz combustible :	78
XXIX.5	Composition des fumées	81

XXIX.6	Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{\text{fumées}}$) :.....	85
XXIX.7	Quantité de chaleur perdue par les parois (Q_{parois}) :.....	89
XXIX.8	Calcul du rendement thermique des fours :.....	90
XXIX.9	Calcul de l'énergie récupérée :.....	91
XXX.	GAIN OBTENU :	93
<hr/> Conclusion Générale <hr/>		
XXXI.	CONCLUSION GÉNÉRALE:.....	95
XXXII.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	96

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Plan de la situation géographique du complexe RA2K	16
Figure 2 : Vue générale des unités de production et de stockage sur station opérateur DCS17	
Figure 3 : Schéma de la section de préchauffe (DCS)	18
Figure 4 : Schéma de principe de la distillation (laboratoire)	19
Figure 5 : Schéma de la section de préfractionnement de l'unité 100 (DCS)	20
Figure 6 : Schéma de la section atmosphérique de l'unité 100 (DCS)	21
Figure 7 : Schéma simplifié de la distillation atmosphérique	22
Figure 8 : Le schéma synoptique du complexe	23
Figure 9 : Représentation du triangle de feu	26
Figure 10 : Caractéristiques de combustion des combustibles gazeux les plus courants à des rapports stœchiométriques (cas de combustion complète)	33
Figure 11 : Contraintes de conception	40
Figure 12 : Deux types de fours pétrochimiques montrant un four cylindrique (à gauche) et un four cabine	42
Figure 13 : Four cabine à tubes horizontaux	43
Figure 14 : Four cylindrique vertical	44
Figure 15 : Schéma de principe d'un four	45
Figure 16 : Schéma simplifié d'un four classique	45
Figure 17 : Image réelle d'un brûleur	47
Figure 18 : Types de tubes	47
Figure 19 : Représentation du garnissage réfractaire	48
Figure 20 : Schéma d'un préchauffeur d'air intégré (interne)	52
Figure 21 : Schéma d'un préchauffeur d'air séparé (externe)	53
Figure 22 : Schéma représentatif des pertes de chaleur dans un four industriel	55
Figure 23 : Diagramme représentant l'évolution de la température de rosée des fumées en fonction de la teneur en soufre du combustible et de la teneur en oxygène des fumées	58
Figure 24 : Séquence de démarrage typique d'un four (la configuration réelle varie selon l'application du four)	59
Figure 25 : Représentation des fours de la section de distillation RA2/K unité 100	60
Figure 26 : Image réelle des fours et du préchauffeur d'air de l'unité 100	61
Figure 27 : Image réelle de la zone de radiation du four 100-F-103	62
Figure 28 : Couplage four de l'unité 100 et le préchauffeur d'air	67
Figure 29 : Système de refroidissement des fumées des trois fours dans un économiseur commun.	69
Figure 30 : Représentation des fours cylindriques et leurs constituants.	72
Figure 31 : Chromatographe en phase gazeuse, laboratoire d'analyse RA2/K	76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Capacité journalière du complexe topping	22
Tableau 2 : Exemples de réactions de combustion	29
Tableau 3 : Pouvoirs calorifiques des combustibles courants.....	31
Tableau 4 : Les réactions et les produits dérivés de la combustion des composants gazeux du combustible dans le cas d'une combustion complète, dans des conditions normales.	32
Tableau 5 : Caractéristiques du four F-101.....	64
Tableau 6 : Caractéristiques du four F-102.....	65
Tableau 7 : Caractéristiques du four F-103.....	66
Tableau 8 : Résumé des caractéristiques de design de chaque four.	74
Tableau 9 : Paramètres opératoires du four F-101	75
Tableau 10 : Paramètres opératoires du four F-102	75
Tableau 11 : Paramètres opératoires du four F-103	76
Tableau 12 : Composition de notre gaz combustible (en % volumique)	77
Tableau 13 : PCI des composants de notre gaz combustible	78
Tableau 14 : Tableau des différentes valeurs empiriques du PCS et PCI des éléments chimiques communs.....	79
Tableau 15 : Récapitulatif de la chaleur fournie par la combustion de notre gaz combustible (avec et sans APH).....	80
Tableau 16 : Les différents volumes V_{CO_2} , V_{H_2O} et V_{N_2} dans chaque réaction de combustion de notre combustible.....	82
Tableau 17 : La composition théorique des fumées.....	83
Tableau 18 : Modèle mathématique de la composition réelle des fumées.....	83
Tableau 19 : Composition réelle des fumées du four F-101.....	84
Tableau 20 : Composition réelle des fumées du four F-102.....	84
Tableau 21 : Composition réelle des fumées du four F-103.....	84
Tableau 22 : Quantité de chaleur perdue par les fumées F-101 (avec préchauffeur d'air)	86
Tableau 23 : Quantité de chaleur perdue par les fumées F-102 (avec préchauffeur d'air)	86
Tableau 24 : Quantité de chaleur perdue par les fumées F-103 (avec préchauffeur d'air)	87
Tableau 25 : Quantité de chaleur perdue par les fumées F-101 (sans préchauffeur d'air)	87
Tableau 26 : Quantité de chaleur perdue par les fumées F-102 (sans préchauffeur d'air)	88
Tableau 27 : Quantité de chaleur perdue par les fumées F-103 (sans préchauffeur d'air)	88
Tableau 28 : Tableau récapitulatif de la quantité de chaleur perdue par les fumées avec et sans préchauffeur d'air	89
Tableau 29 : Tableau récapitulatif de la quantité de chaleur perdue par les parois avec et sans préchauffeur d'air	90
Tableau 30 : Le rendement thermique des fours (avec et sans préchauffeur d'air)	90
Tableau 31 : Relation évolutive entre l'abaissement de température et le gain au niveau du rendement	91

LISTE DES ABREVIATIONS

- APH : Préchauffeur d'air (Air Preheater).
- C_{pi} : Chaleur spécifique du constituant i .
- $C_{p_{moy}}$: Chaleur spécifique moyenne des fumées.
- DCS : Distributed Control System.
- F : Four.
- HGO : Gasoil Lourd.
- LGO : Gasoil Léger.
- M_{va} : débit du combustible consommé par les trois fours fonctionnant avec le préchauffeur d'air.
- M_{vs} : débit du combustible consommé par les trois fours fonctionnant sans le préchauffeur d'air.
- n : Débit molaire des fumées.
- PCI : Pouvoir calorifique inférieur.
- Q : Quantité de chaleur.
- 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.
- T : Température.
- T : Tour.
- T_f : Température de rejet des fumées.
- U : Unité.
- V : Volume.
- γ_i : % molaire (égal au % volumique) du constituant i dans les fumées.
- η : Rendement thermique.

INTRODUCTION

Au cours de l'histoire de l'humanité le pétrole a joué un rôle primordial dans l'évolution de cette dernière, il représente l'essence même de l'ère industrielle.

L'Algérie dotée d'une richesse en ressources naturelles importantes (pétrole brut, gaz naturel, condensat), elle s'est mise dès son indépendance à les exploiter. 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 ce qui est devenue la fondation du système économique algérien.

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.

Le pétrole et le condensat jouent un rôle dominant sur la scène énergétique. L'industrie pétrolière est un secteur extrêmement concurrentiel où la rentabilité est une obligation. C'est ainsi, que nous assistons à des évolutions technologiques importantes se traduisant par des raffineries de plus en plus complexes, et qui nécessitent :

- Une maîtrise des procédés, de leur performance, de leur souplesse d'utilisation et de leur potentiel d'exploitation.
- Une bonne connaissance des produits, de leurs caractéristiques, de leurs contraintes de mise en œuvre pour la faire fonctionner en toute sécurité en préservant l'environnement.

Dans les procédés industriels, la température est considérée comme l'un des principaux paramètres opératoires. En effet, que ce soit pour vaporiser une coupe d'hydrocarbures lors d'une distillation ou bien pour faire réagir certaines molécules à se transformer, des températures allant de -161°C (la liquéfaction du méthane) à 1000°C (craquage de certaines molécules), de nombreux équipements permettent d'ajuster cette variable opératoire. Parmi ces équipements nous avons les fours industriels.

Les fours sont des équipements complexes très énergivores tout mauvais fonctionnement entraîne des pertes considérables en énergie ainsi qu'en combustible tout en engendrant des effets nocifs pour l'environnement, à cet égard ces équipements doivent répondre aux exigences suivantes :

- Une charge thermique déterminée ;
- Un rendement thermique maximal techniquement réalisable ;
- Un bon facteur de marche ;
- Respect de l'environnement.

Dans ce document nous allons parler en détail des fours industriels et principalement les fours F-101 F-102 F-103 du complexe RA2/K ainsi que leur couplage avec un

préchauffeur d'air et son impact sur les rendements de ces derniers ainsi que le gain obtenu grâce à cette technologie, nous allons nous conformer à l'ordre suivant :

- Chapitre I : Origine et description de la raffinerie de condensat RA2/K ;
- Chapitre II : La Combustion ;
- Chapitre III : Les fours industriels ;
- Chapitre IV : Calcul du rendement thermique des fours et le gain obtenu.

Chapitre I

**Origine et description de
la raffinerie de condensat
RA2/K**

I. INTRODUCTION :

L'Algérie est renommée mondialement pour la quantité et la qualité de son pétrole brute (brute léger et BTS) et de son gaz naturel, elle dispose aussi d'une importante quantité de condensat. Pendant des années l'Algérie exportait son condensat et le commercialisait à des prix relativement convenables vu la demande croissante dans le marché international de ce dernier. Dans le but d'augmenter le gain et de valoriser le condensat l'état a décidé de mettre en œuvre le projet Topping de Condensat.

China Petroleum Engineering and Construction Corporation (CPECC) comme un entrepreneur EPC pour SONATRACH est chargé de la réalisation du projet de Topping de Condensat au niveau de la zone industrielle GL1K, ville de Skikda, Algérie.

Ce projet envisage la réalisation d'une nouvelle raffinerie pour traiter le condensat des champs pétroliers algériens en vue de produire le Butane, naphta, Gasoil léger, et Gasoil lourd. En outre, les installations sont installées pour le stockage, traitement et transfert du condensat et ces produits du projet ainsi que le naphta et le mélange C3/C4/C3-C4 de la raffinerie RA1K existante.

RA2/K est destinée à traiter cinq millions (5.000.000) de tonnes métriques pendant une période continue de trois cent trente (330) Jours par an de Condensat provenant du Terminal de la Direction Région Transport Est de Skikda (RTE).

Ce complexe est conçu pour le traitement de cinq (05) différentes charges de Condensat :

- OB#1;
- RHOURE-NOUSS;
- D'ALRAR;
- New OB#1;
- BEJAIA.

Le Complexe fonctionne selon trois (03) cas de marche définis ci-après :

- Cas A : Production maximale de Naphta et production maximale Gasoil (cas de base) ;
- Cas B : Production maximale du Kérosène Jet A1 ;
- Cas C : Production maximale de Naphta et production minimale du Gasoil.

II. SITUATION GÉOGRAPHIQUE DU COMPLEXE RA2K :

Le Complexe Topping de Condensat RA2K est situé dans l'enceinte, Zone Industrielle de Skikda (comme le montre la figure 1), 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'ouest ;
- 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.

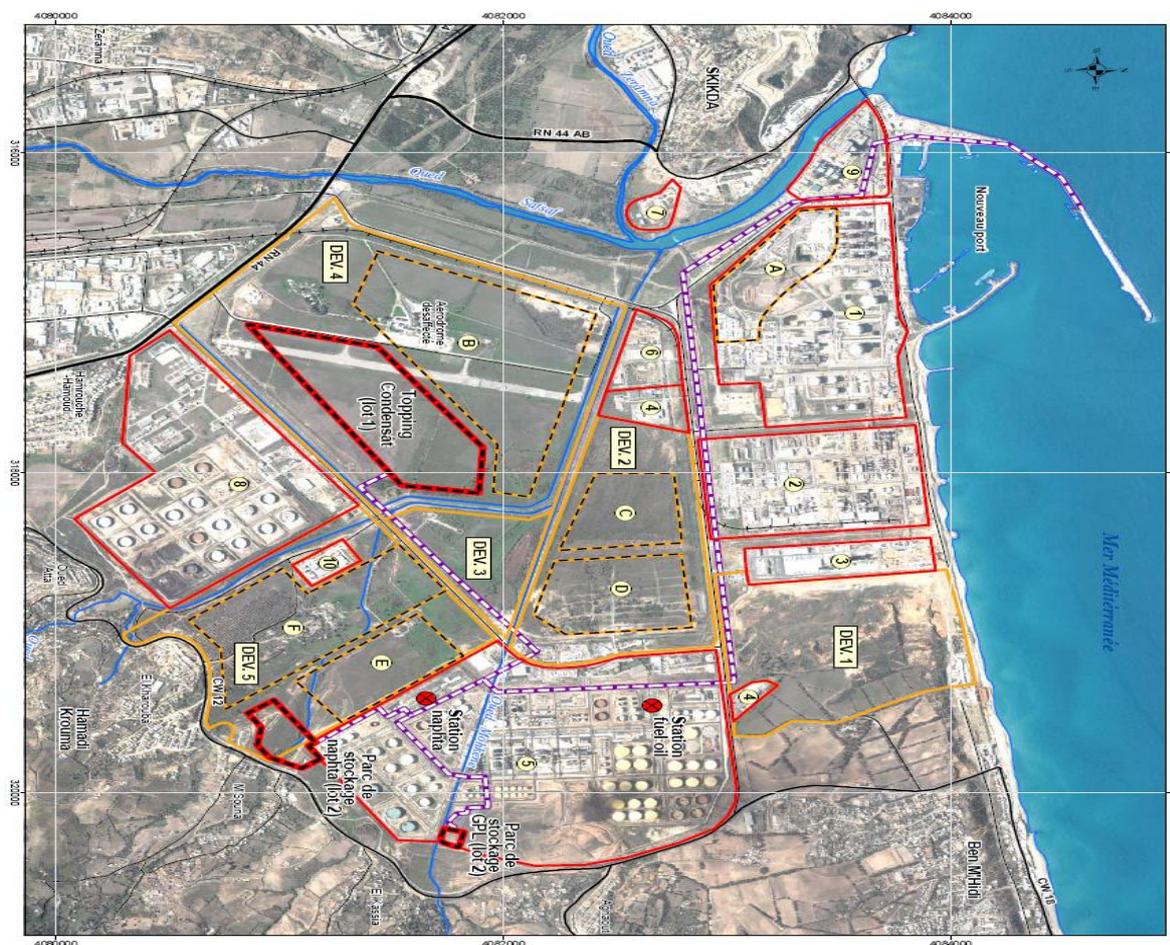


Figure 1 : Plan de la situation géographique du complexe RA2K

III. LES DIFFERENTES INSTALLATIONS DU COMPLEXE RA2/K :

Le Complexe RA2/K est constitué principalement de :

- Unité de distillation du condensat (U100) ;
- Unité de purification et traitement du kérosène (U200) ;
- Installation de stockage et transfert des produits (U300) ;
- Système torche (U400) ;

- Unités de production des utilités et de traitement des eaux (U500) ;
- Laboratoire de contrôle qualité des produits ;
- Atelier de Maintenance ;
- Installations de sécurité et de lutte anti incendie.

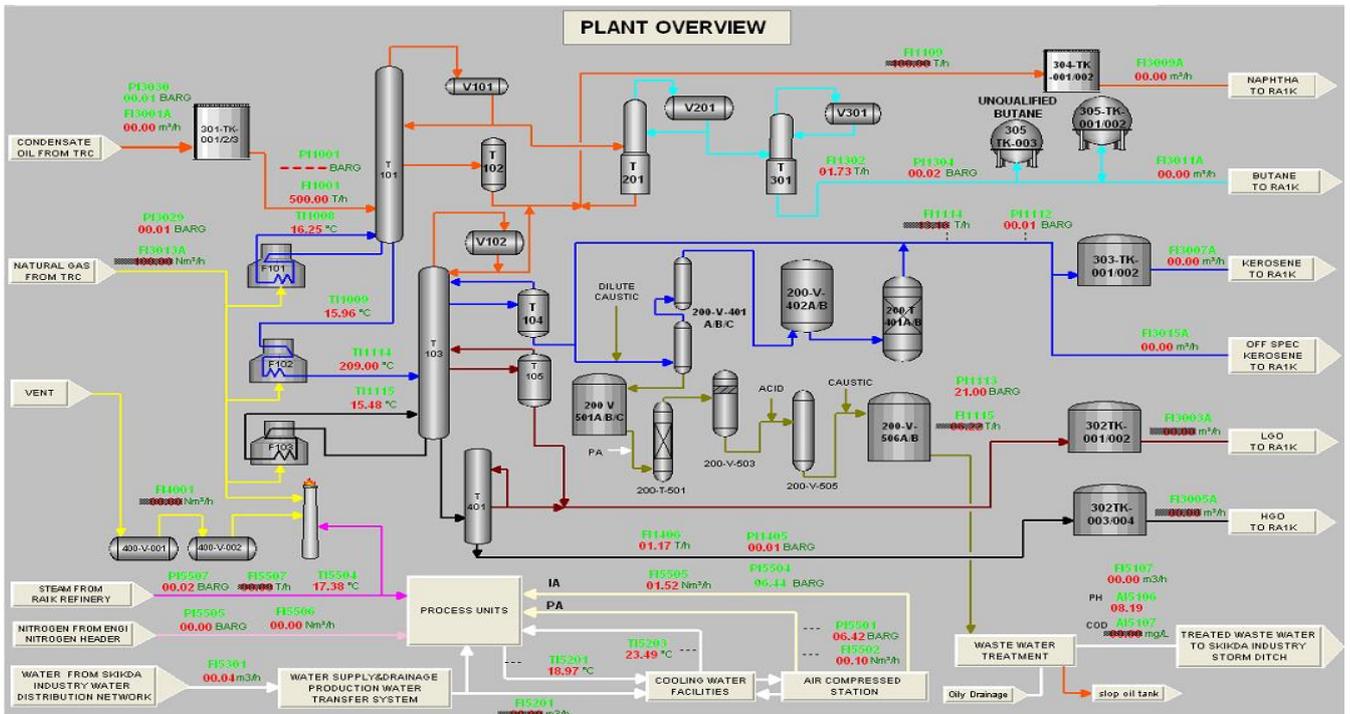


Figure 2 : Vue générale des unités de production et de stockage sur station opérateur DCS

Dans ce document nous nous intéresseront principalement sur l'unité de distillation (U100) là où se trouve nos trois fours à tirage forcé.

IV. FONCTIONNEMENT DE L'UNITE 100 :

Elle est aussi nommée « Topping », cette unité représente l'unité principale du complexe. Cette Unité est conçue pour une capacité de traitement de 5 000 000 T/an de condensat pendant une période continue de 330 jours par an.

Les produits finis de l'unité de production sont :

- Butane ;
- Naphta ;
- Jet A1(kérosène) ;
- Gasoil léger ;
- Gasoil lourd.

IV.1 Les Différentes Parties De L'installation :

- Train d'échangeurs (E101 à E108) ;
- Colonne de préfractionnement : T-101 ;
- Colonne de distillation atmosphérique : T-103 ;
- Colonne de distillation sous vide : T-401 ;
- Colonne de stabilisation des essences : T-201 ;
- Fours : F-101, F-102, F-103 ;
- Système d'injection : amine neutralisante, agent inhibiteur de corrosion, eau de lavage.

IV.2 Train De Préchauffe :

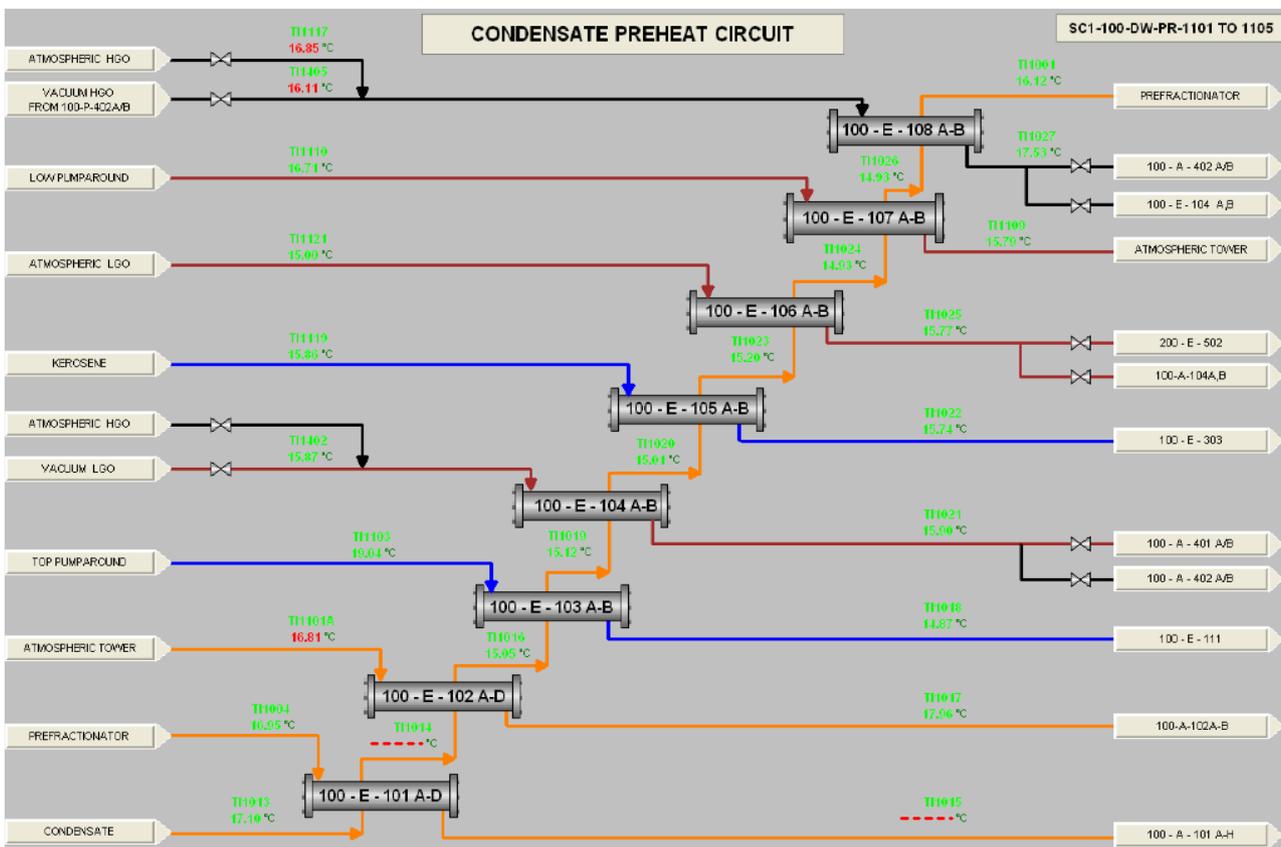


Figure 3 : Schéma de la section de préchauffe (DCS)

Le but principal de cette étape est le chauffage graduel du condensat afin de le préparer au préfractionnement tout en évitant son vapocraquage et gagner une énergie considérable mais aussi de transformer la charge de condensat liquide en une charge biphasique sous l'effet de la détente après son passage par la FV (flow valve) ce qui facilite son fractionnement.

La charge est pompée aux installations de l'unité Topping de Condensât à une pression de limite des batteries 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 T101). Le train d'Échangeur de Préchauffage est divisé en 2 branches parallèles en vue de faciliter le fonctionnement à 50 % du débit.

Avant de parler de la colonne de préfractionnement (T-101) et la colonne atmosphérique (T-103) nous devons d'abord comprendre le principe fondamental de la distillation sur lequel sont fondées ces deux dernières.

IV.3 La Distillation :

Exploitant les différences de volatilité des constituants d'un mélange, la distillation permet la séparation ou, comme l'on dit généralement, le fractionnement de ces constituants en fonction de leur température d'ébullition. La simplicité du procédé et son prix revient relativement modique en font une opération de base dans les processus d'élaboration des produits chimiques et pétroliers ; c'est ainsi qu'en raffinerie, aussi bien que dans les usines de la pétrochimie, les colonnes de distillation sont largement représentées, soit au stade de la préparation de la charge avant réaction, soit au stade du fractionnement après réaction.

Travaillant comme une machine thermique, entre une source chaude (four ou rebouilleur) et une source froide (condenseur de tête), la distillation met en œuvre un contre-courant de liquide vapeur, discontinu dans le cas des colonnes à plateaux ou continue dans le cas des colonnes à garnissages. Comme la thermodynamique l'a montré, le contact des deux phases conduit à un échange de constituants ; les plus volatiles s'accumulent dans la vapeur et sont éliminés au sommet de la colonne alors que les éléments lourds passent en phase liquide et sont soutirés au fond. Cette répartition des constituants entre les deux phases se traduit, entre la tête et le fond de la tour, par un gradient de température qui dérive directement du gradient de concentration. (1)

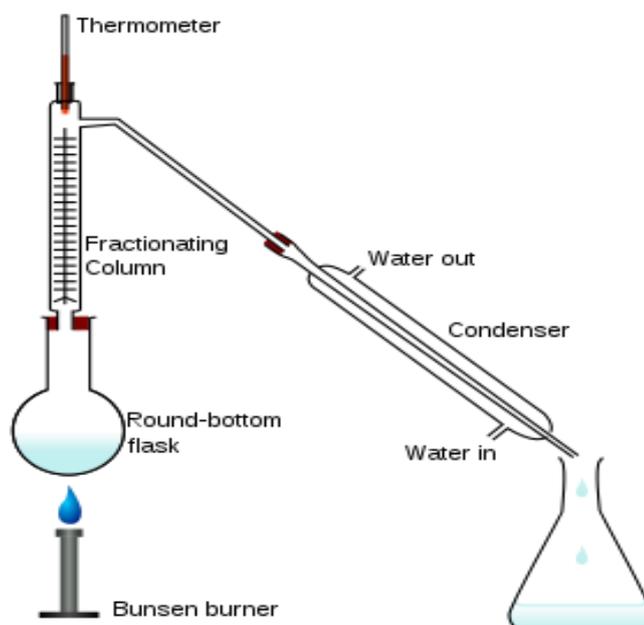


Figure 4 : Schéma de principe de la distillation (laboratoire)

IV.4 Préfractionnement :

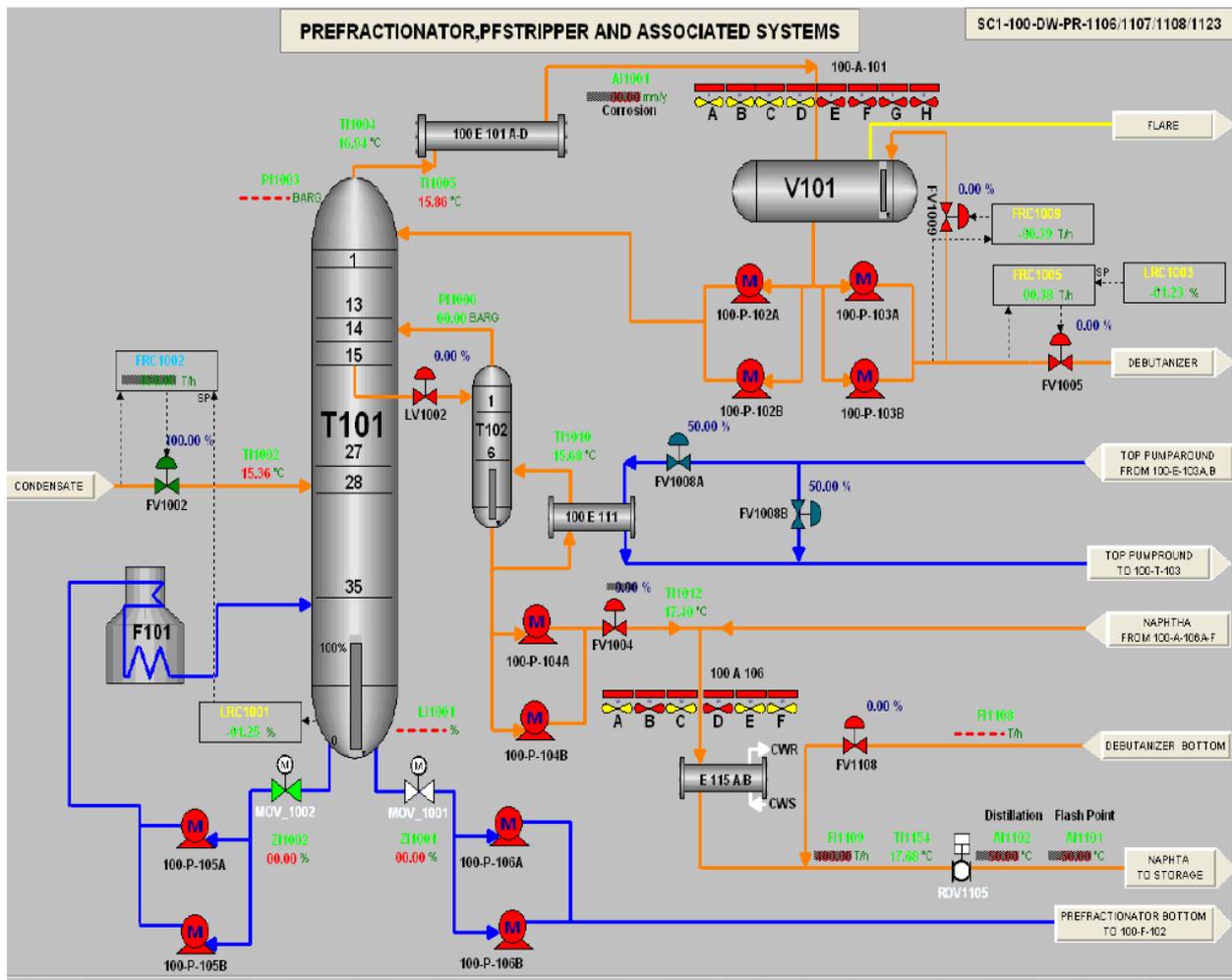


Figure 5 : Schéma de la section de préfractionnement de l'unité 100 (DCS)

Le but de cette étape est de faciliter l'opération de distillation de la tour atmosphérique (T-103).

La colonne 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).

Le rebouilleur de la colonne (T-101) et le four à tirage forcé (F-101).

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

IV.5 Distillation Atmosphérique :

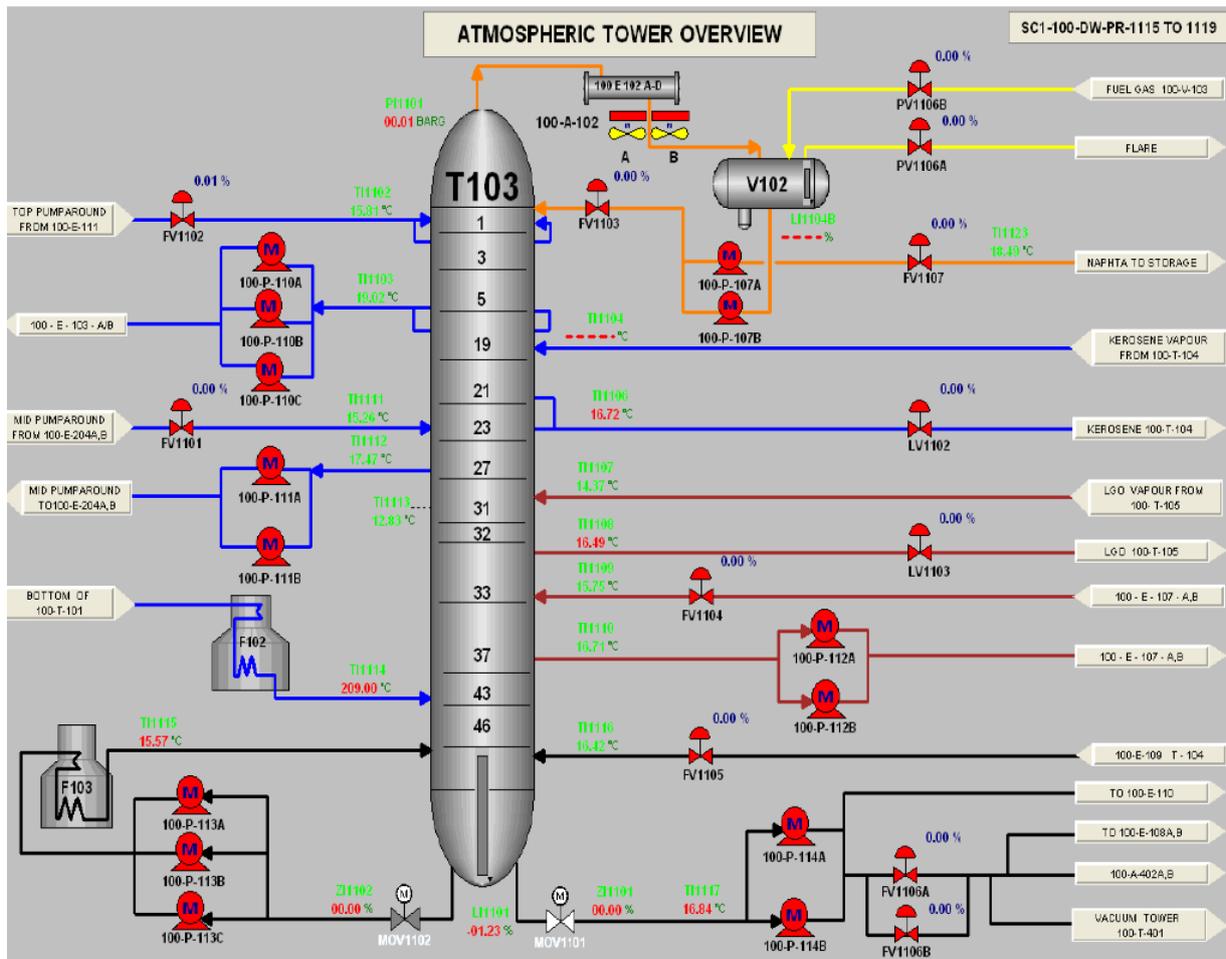


Figure 6 : Schéma de la section atmosphérique de l'unité 100 (DCS)

Cette section représente le cœur de l'unité de fabrication. C'est là où se déroule la grande majorité de la séparation et des soutirages de ces divers produits (coupes).

Le condensat stable issu du préfractionneur T-101 est acheminé vers la colonne atmosphérique T-103 après avoir été préchauffé dans le four F-102 pour donner les quatre produits suivants :

- Coupe de tête (naphta) ;
- Coupe latérale (gasoil léger) ;
- Coupe latérale (kérosène) ;
- Coupe latérale (gasoil lourd).

Le rebouilleur de la colonne atmosphérique (T-103) est le four à tirage forcé (F-103).

La pression opératoire de la colonne (T-103) varie entre 1.5 et 3 bars, la température en fond de colonne peu atteindre les 356°C.

La colonne contient 46 plateaux, elle a deux soutirages latéraux et trois reflux circulants. La colonne reçoit la charge au 46^{ème} plateau.

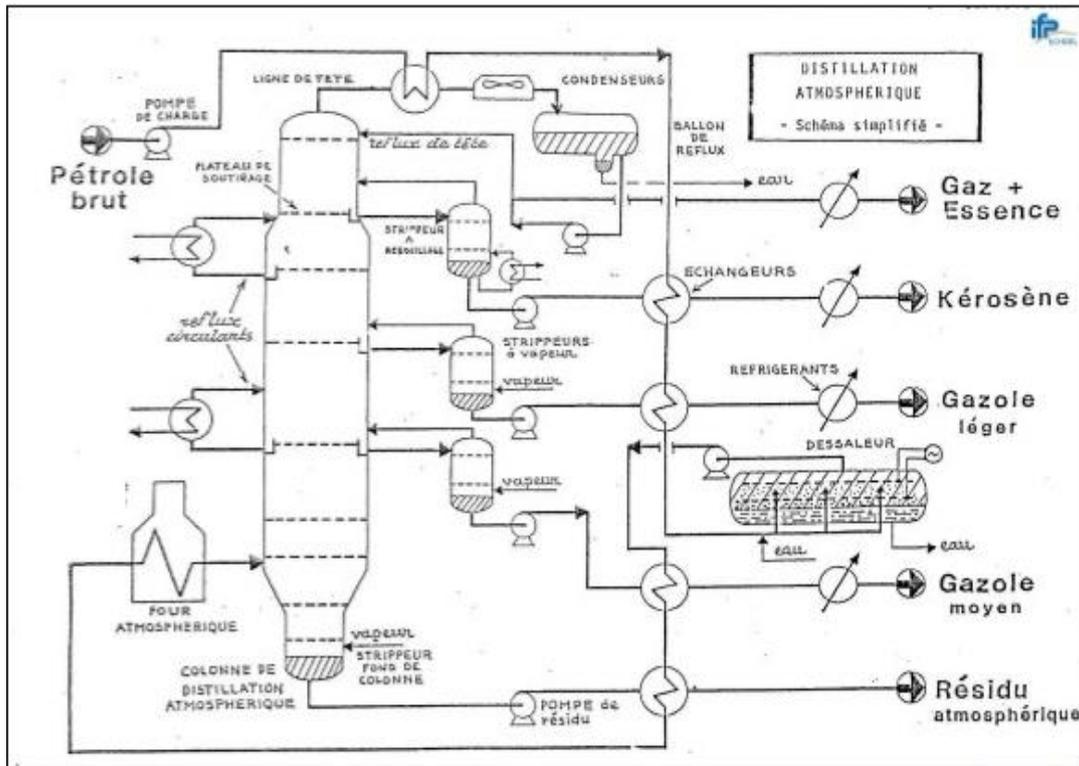


Figure 7 : Schéma simplifié de la distillation atmosphérique

IV.6 Bilan De Matière :

L'unité est conçue pour traiter une charge de condensat de 5 MM t/an soit 15152 t/jour et répondre au programme de production donné dans le tableau 1.

Tableau 1 : Capacité journalière du complexe topping

Produits	Design			Actuel
	Cas A	Cas B	Cas C	
Butane (t/j)	339.2	339.2	339.2	226.08
Naphta (t/j)	12236.8	10515.6	12236.8	12288
Kérosène (t/j)	-	3007.7	1289.8	1696.8
Gasol léger (t/j)	2196.8	908.8	908.8	677.04
Gasol lourd (t/j)	349.1	349.1	349.1	216
Pertes (t/j)	30.1	31.6	28.3	48.08
Total (t/j)	15152	15152	15152	15152

- Cas A : Production maximale de Naphta et Gasoil Leger ;
- Cas B : Production maximale de Kérosène ;
- Cas C : Production maximale de Naphta et minimale Gasoil Leger.

La figure suivante montre le schéma synoptique du complexe :

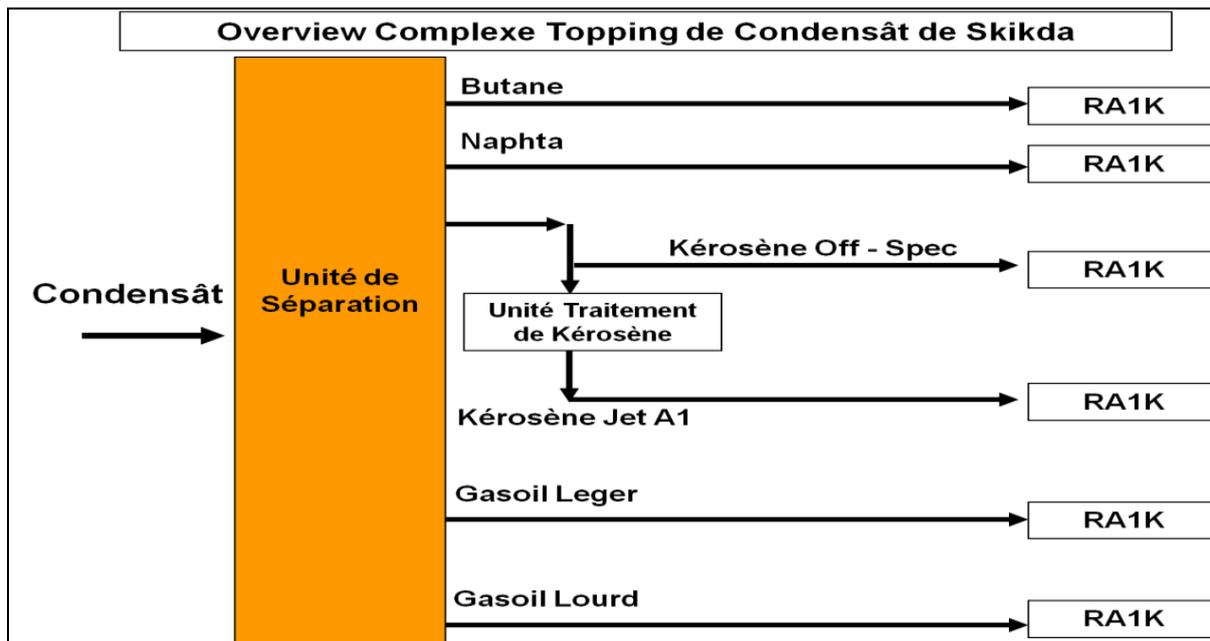


Figure 8 : le schéma synoptique du complexe

Remarque : T dans ce chapitre fait référence au terme « Tour » exemple : T-103 colonne atmosphérique.

Chapitre II La Combustion

V. INTRODUCTION :

Avant de parler des fours nous devons d'abord comprendre le phénomène fondamental sur le quel est basée cette technologie c'est-à-dire « La Combustion ». Dans ce chapitre nous allons évoquer ce qu'est la combustion, l'histoire qui entoure cette dernière.

VI. ORIGINE ET HISTORIQUE :

La combustion peut être considérée comme la technologie la plus ancienne de l'humanité, et l'une de nos découvertes/inventions les plus importantes.

La science de la combustion a une longue histoire. Le feu était l'un des quatre éléments en alchimie, et les processus de combustion étaient utilisés pour de nombreuses transformations. Le feu est utilisé par l'homme depuis longtemps à des fins diverses, telles que la cuisson, la production de métaux et la guerre. Cependant, comme les phénomènes de combustion sont complexes, des progrès significatifs dans la compréhension de la théorie de la combustion n'ont été réalisés qu'au cours des dernières décennies grâce à une étroite collaboration entre expérimentateurs et théoriciens.

Une des premières observations faites par l'alchimiste flamand Johann Baptista van Helmont (1580-1644) a observé qu'une matière en combustion produit de la fumée et une flamme. Il en a conclu que la combustion impliquait la fuite d'un "esprit sauvage" (spiritus silvestre) de la substance en feu. La théorie de Van Helmont a été développée par l'alchimiste allemand Johann Becher (1635-1682) et son élève Georg Ernst Stahl (1660-1734) en la théorie du phlogiston, selon laquelle toutes les matières combustibles contiennent une substance spéciale, le phlogiston, qui est libérée pendant la combustion. Cette théorie est restée en place pendant deux siècles et a été fortement défendue par Joseph Priestley (1733-1804) qui, avec Carl Wilhelm Scheele, est également créditée de la découverte de l'oxygène.

D'autres noms associés au développement de la technologie de la combustion sont James Watt (1736-1819), l'inventeur de la machine à vapeur (plus précisément, il a apporté des améliorations à la machine à vapeur de Newcomen), plus Rudolf Diesel (1858-1913) et Nikolaus Otto (1832-1891), les inventeurs de leurs moteurs homonymes. Au cours de la révolution industrielle (1750-1850), la combustion de combustibles fossiles a commencé à être utilisée à grande échelle pour la production d'énergie, de matières premières, la fabrication de divers biens, principalement à partir d'acier, et le transport, par exemple, grâce aux moteurs à vapeur.

En archéologie et en anthropologie physique, on utilise le système dit des trois âges pour diviser la préhistoire humaine en trois périodes consécutives, nommées en fonction de leurs technologies respectives de fabrication d'outils : l'âge de pierre, l'âge du bronze et l'âge du fer. Les deux dernières sont intimement liées à la combustion. On peut faire une analogie avec l'énergie et parler de "l'âge du charbon", de "l'âge du nucléaire" et de "l'âge des énergies renouvelables", tandis que certains observateurs parlent d'un "deuxième âge du charbon" avec le regain d'intérêt pour la production d'énergie à partir du charbon. Historiquement, l'âge du charbon - également appelé période carbonifère - est l'époque où le charbon s'est

formé : il y a 360 à 290 millions d'années. Il ne fait aucun doute que l'humanité a vécu dans une "ère de la combustion" au cours des derniers siècles. (2)

VII. DEFINITION :

La combustion est un groupe spécifique de réactions chimiques dans lesquelles un combustible et l'oxygène brûlent ensemble à une température suffisamment élevée pour dégager de la chaleur et des produits de combustion. (3)

La combustion est formée d'une trinité :

- Le carburant (Gas, Liquide, Solide) ;
- Le comburant (généralement l'air) ;
- L'énergie d'activation (la majorité des cas c'est la chaleur provenant d'une flamme ou une étincelle).

Ce trio iconique inséparable forme le triangle de feu.

Ce dernier représente la fondation du phénomène de combustion, l'absence d'un seul élément de ce triangle empêche le déclenchement de la combustion ou arrête cette dernière si cette réaction était déjà en cour.



Figure 9 : Représentation du triangle de feu

Le combustible peut être :

- Un gaz (par exemple, l'hydrogène, le gaz naturel) ;
- Un liquide (par exemple, le pétrole, l'alcool, le soufre) ;
- Un solide (par exemple, le charbon, le bois, la tourbe).

La vitesse à laquelle ces réactions de combustion se produisent peut varier d'une décroissance très lente à une explosion instantanée. Cette vitesse est contrôlée à la fois par la cinétique chimique et par les processus de diffusion physique impliqués. L'objectif de l'ingénieur en combustion et de l'exploitant de l'installation est d'obtenir un dégagement de chaleur constant au taux requis pour répondre aux objectifs du processus.

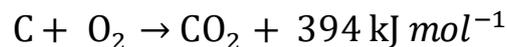
L'étude des réactions de combustion permet de déterminer :

- La quantité d'air nécessaire ;
- La composition et la quantité de fumée ;
- La quantité de chaleur dégagée.

VIII. L'ASPECT CHIMIQUE D'UNE COMBUSTION :

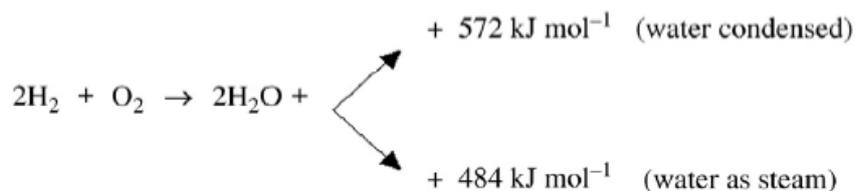
La plupart des combustibles industriels sont des hydrocarbures, appelés ainsi parce que leurs principaux constituants élémentaires sont le carbone et l'hydrogène. Ceux-ci sont oxydés pour libérer de la chaleur pendant la combustion (la combustion étant une réaction exothermique). La chimie de ce processus d'oxydation implique des réactions en chaîne très complexes. Cependant, pour la plupart des besoins de conception technique, nous pouvons raisonnablement simplifier la chimie en quatre réactions de base. Les équations suivantes définissent le système simple de réaction chimique (SCRS). (4)

VIII.1 L'oxydation Complète Du Carbone :



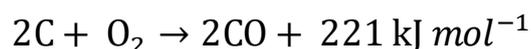
Si l'oxygène est présent en quantité suffisante dans le mélange, la réaction ci-dessus décrit le résultat global de l'oxydation du carbone. Cependant, cette réaction se produit rarement dans les systèmes de combustion pratiques, mais est le résultat d'une chaîne de réactions impliquant le monoxyde de carbone comme produit intermédiaire. (3)

VIII.2 L'oxydation Complète De L'hydrogène :



La différence d'état physique de l'eau produite à la suite de l'oxydation de l'hydrogène est la raison de la complexité des pouvoirs calorifiques nets et bruts des combustibles hydrocarbonés. Le dégagement de chaleur brut est celui qui est libéré lorsque l'hydrogène est oxydé et l'eau condensée, tandis que le pouvoir calorifique net est la chaleur qui est libérée pendant que l'eau reste sous forme de vapeur. Le premier est également appelé pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le second, pouvoir calorifique inférieur (PCI). La vitesse d'oxydation de l'hydrogène est beaucoup plus rapide que celle du carbone. Ce qui fait que l'hydrogène réagit de préférence avec l'oxygène disponible dans le mélange. (3)

VIII.3 L'oxydation Incomplète Du Carbone :



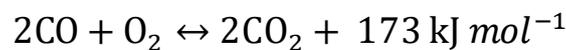
En cas de combustion imparfaite ou incomplète, tout le carbone contenu dans le combustible ne sera pas oxydé en dioxyde de carbone, mais une partie sera partiellement oxydée en monoxyde de carbone. Le principal effet de la production de monoxyde de carbone sur le processus de combustion est de réduire le dégagement de chaleur du combustible.

On peut voir que seulement un peu plus de la moitié de la chaleur est libéré dans la production de monoxyde de carbone, comparé à la combustion complète du carbone. Par conséquent, tout brûleur produisant du monoxyde de carbone en raison d'un déséquilibre

stœchiométrique ou d'un mauvais mélange air-carburant induit une baisse significative de l'efficacité de la combustion. Le monoxyde de carbone est également un important polluant atmosphérique et constitue un danger pour la santé en tant que gaz toxique en gaz toxique à des concentrations élevées s'il est libéré dans l'atmosphère. Il est donc absolument essentiel d'empêcher la production à des niveaux significatifs de monoxyde de carbone dans tout système de combustion. (3)

VIII.4 L'oxydation Du Monoxyde De Carbone :

Le monoxyde de carbone est le réceptacle indésirable d'une énergie de combustion considérable dans les systèmes de combustion inefficaces. Dans de nombreux cas où des hydrocarbures sont brûlés, les réactions d'oxydation se déroulent rapidement jusqu'à la formation de CO, puis lentement jusqu'à la combustion du CO. Le monoxyde de carbone peut encore être oxydé en dioxyde de carbone selon la réaction chimique réversible suivante :



La combustion du monoxyde de carbone sec est extrêmement lente. Toutefois, si des radicaux contenant de l'hydrogène sont présents dans la flamme, la vitesse de combustion du monoxyde de carbone (humide) augmente considérablement. (3)

IX. TYPES DE 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).

X. CARACTERISTIQUES DE LA COMBUSTION :

X.1 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).

Dans le tableau ci-dessous trouvera l'exemple de quelques réactions de combustion et leur chaleur dégagée :

Tableau 2 : Exemples de réactions de combustion

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

X.2 Pouvoir Calorifique :

On distinguera deux types de pouvoir calorifique comme évoqué précédemment dans l'oxydation de l'hydrogène :

- **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.

X.3 Pouvoir Combustif :

Quantité d'air nécessaire à la combustion neutre d'un kilogramme de combustible solide ou liquide, ou d'un m³ de gaz (à 0°C, 760 mm de Hg). En kg d'air par kg de combustible (pour les solides) ou en Nm³d'air par Nm³ de combustible (pour les gaz).

X.4 Pouvoir Fumigène :

Poids ou volume dégagés par la combustion neutre d'un kilogramme de combustible solide ou liquide, ou d'un m³ de gaz (à 0°C, 760 mm de Hg). En kg de fumées par kg de combustible ou Nm³ de fumées par Nm³ de combustible.

X.5 L'indice De Wobbe :

Est souvent utilisé pour caractériser les gaz et en particulier apprécier leur interchangeabilité. Il est défini en tant que le quotient de son pouvoir calorifique par la racine carrée de sa densité.

$$W = \frac{PCS}{\sqrt{d_0}}$$

Pour une pression déterminée, la quantité de gaz qui passe à travers un orifice (tel un brûleur) est inversement proportionnelle à la racine carrée de sa densité ; la quantité d'énergie qui passe par cet orifice est donc proportionnelle au pouvoir calorifique du gaz et inversement proportionnelle à la racine carrée de sa densité. Pour garantir la sécurité d'utilisation d'un appareil, il faut ajuster précisément la quantité d'air nécessaire à la combustion à la quantité d'énergie apportée par le gaz, donc la caler sur l'indice de Wobbe. (3)

X.6 La Flamme :

La flamme est le volume dans lequel s'effectuent les réactions de combustions, Il peut être plus grand que la partie visible qui est couramment considérée comme la flamme.

X.7 Excès D'air :

C'est la quantité d'air au-delà de la stœchiométrie nécessaire à la combustion complète du combustible.

X.8 Température De Flamme :

Cette température peut être estimée en considérant une combustion adiabatique, c'est à dire que la chaleur dégagée par la combustion est intégralement fournie aux produits de la combustion au niveau de la flamme, sous forme de chaleur sensible (et/ou latente). Les produits de la combustion cèdent ensuite une part de leur énergie par rayonnement dans le foyer, une autre partie de leur énergie par convection/conduction, et en conservent une partie en quittant la chaudière ou le four à température plus ou moins importante. (2)

XI. ESTIMATION DU POUVOIR CALORIFIQUE D'UN MELANGE 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.

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

Avec :

- PCI : Pouvoir calorifique du mélange
- PCI_i : Pouvoir calorifique du constituant i
- y_i : fraction molaire ou volumique du constituant i

Les pouvoirs calorifiques de quelques combustibles gazeux sont rassemblés dans le tableau suivant : (5)

Tableau 3 : Pouvoirs calorifiques des combustibles courants

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	

XII. LES CALCULS DANS LA COMBUSTION :

Les fours industriels que nous allons étudier dans ce document utilisent un combustible gazeux c'est pour ça que nous allons nous focaliser sur les calculs qui concerne les combustibles gazeux.

XII.1 Quantité D'air Nécessaire Des Combustibles Gazeux :

Pour déterminer l'oxygène et l'air nécessaires à une combustion complète, il faut utiliser les réactions élémentaires de combustion des composants combustibles du gaz combustible, comme indiqué dans le **Tableau 4**.

Par exemple, si le combustible contient 85% de CH₄, 10% de H₂ et 5% de N₂, seules les réactions stœchiométriques du méthane et de l'hydrogène doivent être prises en compte :

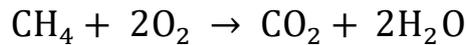


Tableau 4 : les réactions et les produits dérivés de la combustion des composants gazeux du combustible dans le cas d'une combustion complète dans des conditions normales.

Combustible Gas	Combustion Reaction	Oxygen m ³ m ⁻³		Air Req. m ³ m ⁻³			Flue gas Components m ³ m ⁻³			Flue Gas Volume m ³ m ⁻³	
		V _{O₂}	V _{air}	V _{CO₂}	V _{H₂O}	V _{N₂}	V _{flue, wet}	V _{flue, dry}			
Carbon monoxide	CO + 0.5 O ₂ = CO ₂	0.5	2.38	1	–	1.88	2.88	2.88			
Hydrogen	H ₂ + 0.5 O ₂ = H ₂ O	0.5	2.38	–	1	1.88	2.88	–			
Methane	CH ₄ + 2O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O	2.0	9.52	1	2	7.52	10.52	8.52			
Ethane	C ₂ H ₆ + 3.5 O ₂ = 2CO ₂ + 3H ₂ O	3.5	16.65	2	3	13.15	18.15	15.15			
Propane	C ₃ H ₈ + 5O ₂ = 3CO ₂ + 4H ₂ O	5.0	23.80	3	4	18.80	25.80	21.80			
Butane	C ₄ H ₁₀ + 6.5 O ₂ = 4CO ₂ + 5H ₂ O	6.5	30.95	4	5	24.45	33.45	28.45			
Pentane	C ₅ H ₁₂ + 8O ₂ = 5CO ₂ + 6H ₂ O	8.0	38.10	5	6	30.08	41.08	35.08			
Hexane	C ₆ H ₁₄ + 9.5 O ₂ = 6CO ₂ + 7H ₂ O	9.5	45.20	6	7	35.70	48.70	41.70			
Heptane	C ₇ H ₁₆ + 11 O ₂ = 7CO ₂ + 8H ₂ O	11.0	52.40	7	8	41.35	56.35	48.35			
Octane	C ₈ H ₁₈ + 12.5 O ₂ = 8CO ₂ + 9H ₂ O	12.5	59.50	8	9	47.00	64.00	55.00			
Acetylene	C ₂ H ₂ + 2.5 O ₂ = 2CO ₂ + H ₂ O	2.5	11.90	2	1	9.40	12.40	11.40			
Ethylene	C ₂ H ₄ + 3O ₂ = 2CO ₂ + 2H ₂ O	3.0	14.30	2	2	11.28	15.28	13.28			
Benzene	C ₆ H ₆ + 7.5 O ₂ = 6CO ₂ + 3H ₂ O	7.5	35.70	6	3	28.20	37.20	34.20			

La combustion d'une mole de CH₄ nécessite 2 moles de O₂, tandis qu'une mole de H₂ nécessite 0,5 mole d'O₂. Il est bien connu que le volume molaire de tout gaz idéal est le même :

22,41dm³ mol⁻¹ ou 22,41m³ kmol⁻¹ à la température de 273,15 K et à la pression de 101,3 kPa. Ainsi, la combustion complète de 22,4 m³ de CH₄ nécessite 44,8 m³ d'O₂, tandis que la Combustion complète de 22,4 m³ de H₂ nécessite 11,2 m³ d'O₂. Dans l'exemple ci-dessus, 1m³ de combustible gazeux contient 0,85m³ de CH₄ et 0,1m³ de H₂, Ainsi, l'oxygène total nécessaire à la combustion complète du mélange est :

$$V_{\text{O}_2} = (0.85 \times 2) + (0.1 \times 0.5) = 1.75 \text{ m}^3$$

Si la combustion est alimentée par de l'air sec, sa composition normale peut être utilisée et on peut supposer 21% d'oxygène et 79% d'azote. Dans ce cas, la teneur en azote de l'air est de 79/21=3,762 fois le volume de l'oxygène stœchiométrique. Alternativement, on peut dire, que l'air nécessaire à une combustion complète est 100/21=4,76 fois l'oxygène nécessaire. (2)

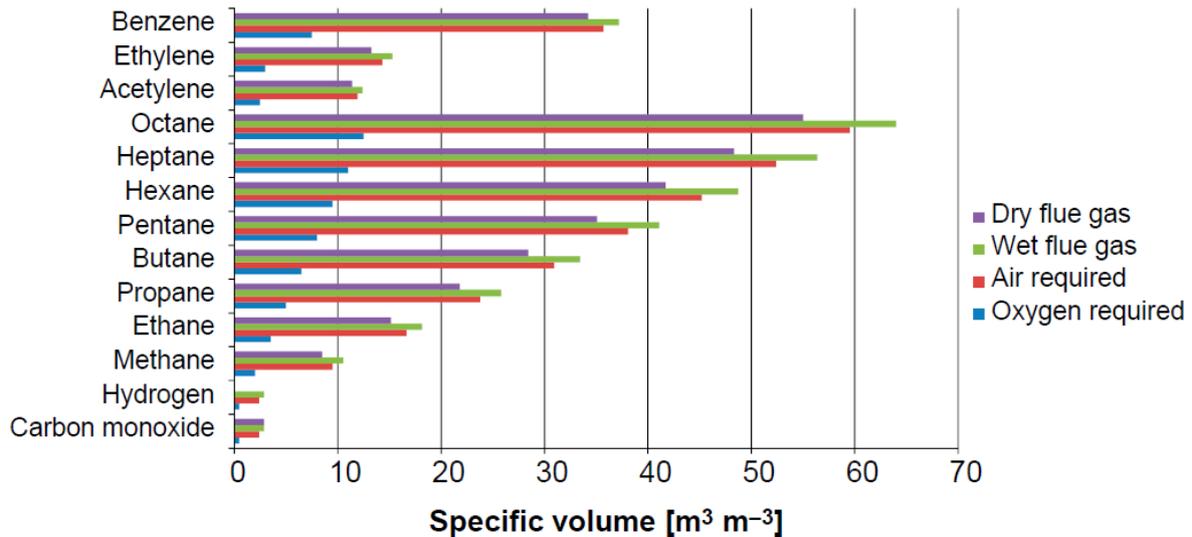


Figure 10 : Caractéristiques de combustion des combustibles gazeux les plus courants à des rapports stœchiométriques (cas de combustion complète)

Par conséquent, dans l'exemple ci-dessus, le besoin en air pour 1m³ de carburant est le suivant :

$$V_{air} = 1.75 + (1.7 \times 3.76) = 8.34 \text{ m}^3$$

Où

$$V_{air} = 1.75 \times 4.76 = 8.34 \text{ m}^3$$

L'équation générale du besoin théorique (stœchiométrique) d'air pour la combustion parfaite d'un mélange combustible gazeux est la suivante, sur la base des réactions stœchiométriques de tous les composants combustibles, comme indiqué dans le tableau 4 :

$$V_{air, stoch} = 0.0476 \times (0.5 \times CO + 0.5 \times H_2 + 2 \times CH_4 + 3.5 \times C_2H_6 + 5 \times C_3H_8 + \dots + 2.5 \times C_2H_2 + 3 \times C_2H_4 + 7.5 \times C_6H_6 - O_2)$$

En réalité en raison d'un mélange imparfait dans les cas pratiques - il faut plus d'air que la quantité stœchiométrique, qui se calcule comme suit :

$$V_{air} = \lambda \times V_{air, stoch} \text{ m}^3$$

λ Est le facteur d'air (également appelé facteur d'excès d'air), le rapport entre l'apport d'air réel et l'apport stœchiométrique. Sa valeur dépend de l'efficacité du mélange du combustible et de l'air de combustion. Les valeurs typiques pour les combustibles gazeux dans les équipements industriels sont $\lambda = 1.05 \dots 1.15$.

XII.2 Calcul Du Volume Et De La Composition Des Fumées De Combustion :

Le volume et la composition des gaz de combustion peuvent être déterminés de la même manière que pour le calcul des besoins en air.

On prend à nouveau la combustion du gaz présenté dans l'exemple précédent. Le mélange contient 85% CH₄, 10% H₂ et 5% N₂.

Il devrait être clair que la combustion d'une mole de méthane produit 1 mole de CO₂ et 2 moles de H₂O. La combustion d'une mole de H₂ donne une mole de H₂O. Outre le CO₂ et le H₂O, les fumées de combustion contiennent également de l'azote N₂. Même si la fumée ne contient pas d'azote, ce composant est présent dans l'air de combustion qui entre dans le processus. Dans le cas d'une combustion stœchiométrique de 1m³ de combustible, les fumées de combustion générées contiendront les composants suivants :

$$0.85 \text{ m}^3 \text{ CO}_2$$

$$2 \times 0.85 + 0.1 = 1.8 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}$$

$$1.75 \times 3.762 = 6.59 \text{ m}^3 \text{ N}_2$$

Ainsi le volume total des fumées de combustion est de :

$$0.85 + 1.8 + 0.05 + 6.59 = 9.29 \text{ m}^3$$

La composition en pourcentage volumétrique est :

$$CO_2 = \frac{0.85}{9.29} \times 100 = 9.15\%$$

$$H_2O = \frac{1.8}{9.29} \times 100 = 19.40\%$$

$$N_2 = \frac{6.59 + 0.05}{9.29} \times 100 = 71.45\%$$

Si la combustion n'est pas stœchiométrique ($\lambda = 1$), il y aura également de l'oxygène dans les fumées de combustion parce que l'excès d'oxygène ne réagit tout simplement pas avec le combustible et augmente ainsi le volume des fumées de combustion. L'excès d'oxygène s'accompagne d'un excès d'azote dans des proportions appropriées.

Une équation généralisée pour le calcul du volume et de la composition des fumées de combustion - utilisant les équations du tableau 4 - est la suivante :

Volume du gaz humide :

$$V_{\text{fumée humide}} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} + V_{N_2} \text{ m}^3$$

Ou on a :

$$V_{CO_2} = 0.01 \times (CO_2 + CO + CH_4 + mC_mH_n) \text{ m}^3$$

$$V_{H_2O} = 0.01 \times \left(H_2 + CH_4 + \frac{n}{2} \times C_mH_n \right) \text{ m}^3$$

$$V_{O_2} = 0.21 \times ((\lambda - 1) \times V_{\text{air, stoch}}) \text{ m}^3$$

$$V_{N_2} = 0.79 \times V_{air} + 0.01 \times N_2 \text{ m}^3$$

Les gaz de combustion secs ne contiennent pas de vapeur d'eau :

$$V_{fumée\ sec} = V_{CO_2} + V_{O_2} + V_{N_2} \text{ m}^3$$

Une valeur caractéristique de divers combustibles est la teneur en CO_2 de leurs fumées de combustion sèches, générées dans des conditions stœchiométriques. Il s'agit d'une valeur maximale, car une combustion pauvre en combustible (excès d'air) dilue les fumées de combustion avec de l' O_2 et du N_2 , tandis qu'une combustion riche en combustible (manque d'air) produit du CO à la place d'une partie du CO_2 . Cette valeur peut également être calculée à partir de la composition réelle du combustible.

$$CO_{2\ max} = \frac{V_{CO_2}}{V_{CO_2} + V_{N_2, stoch}} \times 100 \%$$

Ou on a :

$$V_{N_2, stoch} = 0.79 \times V_{air, stoch} + 0.01 N_2 \text{ m}^3$$

Valeurs typiques pour le CO_2 max :

- Gaz naturel : 11.8 - 12.0%
- Propane-butane : 13.9 - 14.0 %.

XIII. PARAMETRES DE LA COMBUSTION :

Dans ce qui suit nous allons parler de deux paramètres qui influencent la combustion. Le taux d'oxygène dans l'air, l'effet de la pression et la température sur la combustion.

XIII.1 L'effet De L'enrichissement En Oxygène :

Le volume et la composition des fumées de combustion lorsque de l'air enrichi en oxygène est utilisé sont influencés par le rapport O_2/N_2 réel. Tout le reste devrait être trivial à présent :

Dans l'exemple ci-dessus pour le cas d'une teneur en oxygène de 30% dans l'air de combustion et d'un excès d'air de 20% ($\lambda=1,2$), la composition des fumées de combustion est la suivante :

$$\begin{aligned} &0,85 \text{ m}^3 \text{ CO}_2 \\ &1,8 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O} \\ &1,75 \cdot 1,2 - 1,75 = 0,35 \text{ m}^3 \text{ O}_2 \\ &1,75 \cdot 1,2 \cdot 2,33 + 0,05 = 4,95 \text{ m}^3 \text{ N}_2 \end{aligned}$$

Le volume total des produits de combustion est :

$$V_{fumée, humide} = 0.85 + 1.8 + 0.35 + 4.95 = 7.95 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$$

XIII.2 Effet De La Température Et De La Pression (Loi Des Gaz Parfaits) :

Cette valeur numérique calculée ci-dessus est valable à l'état normal, c'est-à-dire à la température $T_0=273.15$ K et à la pression $p_0=101.325$ Pa. Évidemment, la température réelle (et souvent la pression aussi) peut être différente de celle de l'état normal. En général, on peut supposer que nos composants gazeux, y compris les fumées de combustion, se comportent comme un gaz parfait.

La loi du gaz parfait peut être écrite comme suit :

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Où on a :

- p : la pression (Pa) ;
- V : le volume (m^3) ;
- n : la quantité de gaz (mol) ;
- R : la constante des gaz idéaux ($8,314$ J mol⁻¹ K⁻¹) ;
- T : la température absolue (K).

C'est donc le volume réel (mesurable) des fumées de combustion à la température $T_{\text{combustible}}$ et à la pression $p_{\text{combustible}}$:

$$V_{\text{fumée}} = \frac{p_0}{p_{\text{fumée}}} \times \frac{T_{\text{fumée}}}{T_0} \times V_0$$

La composition en pourcentage volumétrique est :

$$CO_2 = \frac{0.85}{7.95} \times 100 = 10.5\%$$

$$H_2O = \frac{1.8}{7.95} \times 100 = 23.2\%$$

$$N_2 = \frac{4.95}{7.95} \times 100 = 62.1\%$$

$$O_2 = \frac{0.35}{7.95} \times 100 = 4.2\%$$

La composition d'un mélange de gaz idéal ne change pas sous l'effet d'une variation de température ou de pression, sauf si l'on considère les réactions de dissociation à la température examinée (par exemple, celle de la flamme).

Ainsi, l'augmentation de la teneur en oxygène de l'air diminue le volume des fumées de combustion (et par conséquent la température adiabatique de la flamme).

XIV. DETERMINATION DU FACTEUR D'EXCES D'AIR REEL :

Afin d'examiner le processus de combustion réel, il est nécessaire de mesurer la composition des fumées de combustions générées. A partir de ces mesures, on peut calculer le facteur d'excès d'air réel. Pour cela, il faut utiliser la composition des fumées de combustion sèches, car la plupart des analyseurs de fumée de combustion fournissent des données directes sur les fumées de combustion sèches. (2)

L'équation suivante est basée sur le bilan azoté du combustible, de l'air de combustion et des fumées de combustion, ainsi que sur la teneur en O₂ en excès, apparaissant dans les fumées de combustion. Dans le cas des combustibles solides et liquides, le calcul est basé sur la teneur en azote fournie par le volume d'air de combustion stœchiométrique et réel (effectif).

$$\lambda = \frac{V_{air}}{V_{air, stoch}} = \frac{N_2}{N_2 - \frac{79}{21} O_2} = \frac{1}{1 - 3.76 \frac{O_2}{N_2}}$$

La plupart des combustibles gazeux contiennent déjà de l'azote, il faut donc prendre en compte l'azote du combustible en plus de l'azote des fumées de combustion :

$$\lambda = \frac{V_{air}}{V_{air, stoch}} = \frac{N_2 - \frac{N_{2, combustible}}{V_{fumée seche}}}{\left(N_2 - \frac{N_{2, combustible}}{V_{fumée seche}} \right) - 3.762 \times O_2} = \frac{1}{1 - 3.762 \times \frac{O_2}{N_2 - \frac{N_{2, combustible}}{V_{fumée seche}}}}$$

Une combustion incomplète produit des composants CO₂, CO, H₂, H₂O et N₂ dans les fumées de combustion. La consommation d'oxygène diminue de 0,5 (CO + H₂), le volume d'air change donc de :

$$\frac{4.76}{2} (CO + H_2)$$

Tandis que la teneur en azote varie de :

$$\frac{3.76}{2} (CO + H_2)$$

Le facteur d'excès d'air réel dans ce cas peut être calculé comme suit :

$$\lambda = \frac{N_2}{N_2 - 3.76 \left(O_2 - \frac{CO}{2} - \frac{H_2}{2} \right)}$$

Chapitre III

Les Fours Industriels

XV. INTRODUCTION

Le fonctionnement des unités industriels 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.

Les fours sont des équipements clés pour l'industrie du raffinage, du gaz et de la pétrochimie. Ils doivent, grâce à leur conception, répondre aux exigences nombreuses émises par les utilisateurs comportant essentiellement une charge thermique déterminée, un rendement thermique maximal techniquement réalisable, un bon facteur de marche et une flexibilité d'opération satisfaisante avec le souci de respecter les impératifs de sécurité. D'où l'importance des problèmes posés par la conception, la construction, la conduite et l'entretien des fours.

XVI. ROLE 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.

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.

XVII. PRINCIPAUX OBJECTIFS ET CONTRAINTES DES CONCEPTEURS ET OPERATEURS DE FOURS

Les constructeurs de fours industriels sont contraints de suivre certaines règles afin d'avoir un design approprié parmi ces contraintes on site :

- Type du procédé ;
- Conditions opératoires du procédé ;
- Contrôle gouvernemental ;

- Les standards et normes ;
- Contraintes économiques.

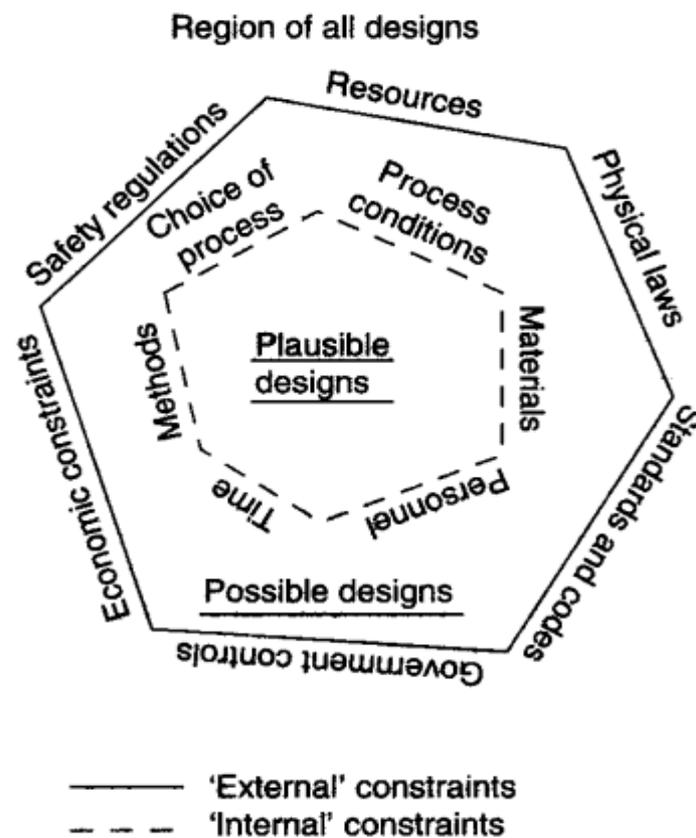


Figure 11 : Contraintes de conception

Les objectifs de la conception du four :

- Obtenir un produit satisfaisant ;
- Utiliser un minimum de combustible et d'énergie pour obtenir ce produit ;
- Construire le four au coût d'investissement le plus bas ;
- Opérer avec les niveaux d'effectifs les plus bas possibles ;
- Obtenir une durée de vie satisfaisante avec de faibles coûts de maintenance.

Le premier objectif l'emporte sur tous les autres car si le produit n'est pas satisfaisant, il ne peut être vendu ou doit être vendu à un prix inférieur. Bien que la sécurité ne soit pas mentionnée dans les objectifs ci-dessus, elle peut être considérée comme une évidence dans l'environnement actuel.

L'art de la conception d'un four consiste à obtenir la meilleure combinaison de ces cinq objectifs pendant toute la durée de vie du four, en d'autres termes à fabriquer un produit de haute qualité au coût le plus bas possible.

Les utilisateurs de fours ont généralement acheté sur la base du coût, ce qui est compréhensible, étant donné que les autres objectifs sont beaucoup plus difficiles à évaluer au stade de l'appel d'offres. Cette approche a conduit à ce que relativement peu d'efforts d'ingénierie soient consacrés à l'amélioration des conceptions existantes, car le temps d'ingénierie est coûteux et les coûts sont difficiles à récupérer pour le constructeur du four. Cependant, l'augmentation des coûts du combustible et de l'énergie imposera de nouvelles exigences aux concepteurs et aux exploitants de fours ce qui obligera à adopter une nouvelle approche pour de nombreuses applications. (6)

XVIII. 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 :

XVIII.1 Réchauffage D'un Fluide Sans Changement De Phase :

- Les fours à huile chaude placés sur un circuit alimentant plusieurs échangeurs où se fait le transfert des calories au procédé.
- Les fours de charge de certaines unités où il s'agit de porter le fluide à la température nécessaire pour obtenir une réaction chimique qui se produit dans un réacteur.
- 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).

XVIII.2 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.

XVIII.3 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.

XIX. DIFFERENTS 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.



Figure 12 : Deux types de fours pétrochimiques montrant un four cylindrique (à gauche) et un four cabine

XIX.1 Fours Cabines A 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.

XIX.2 Fours Cabines A 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. (6)

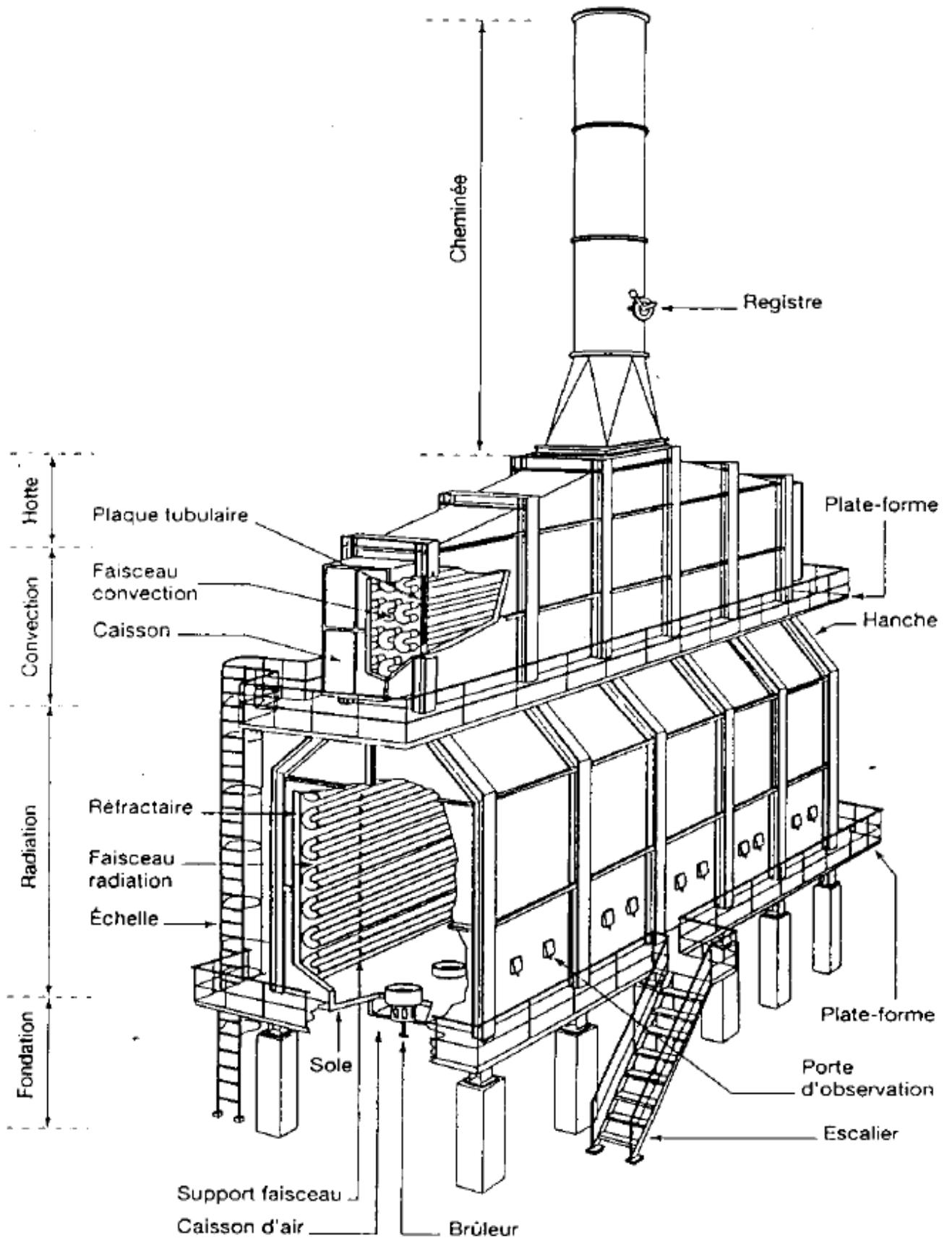


Figure 13 : Four cabine à tubes horizontaux

XIX.3 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. (6)

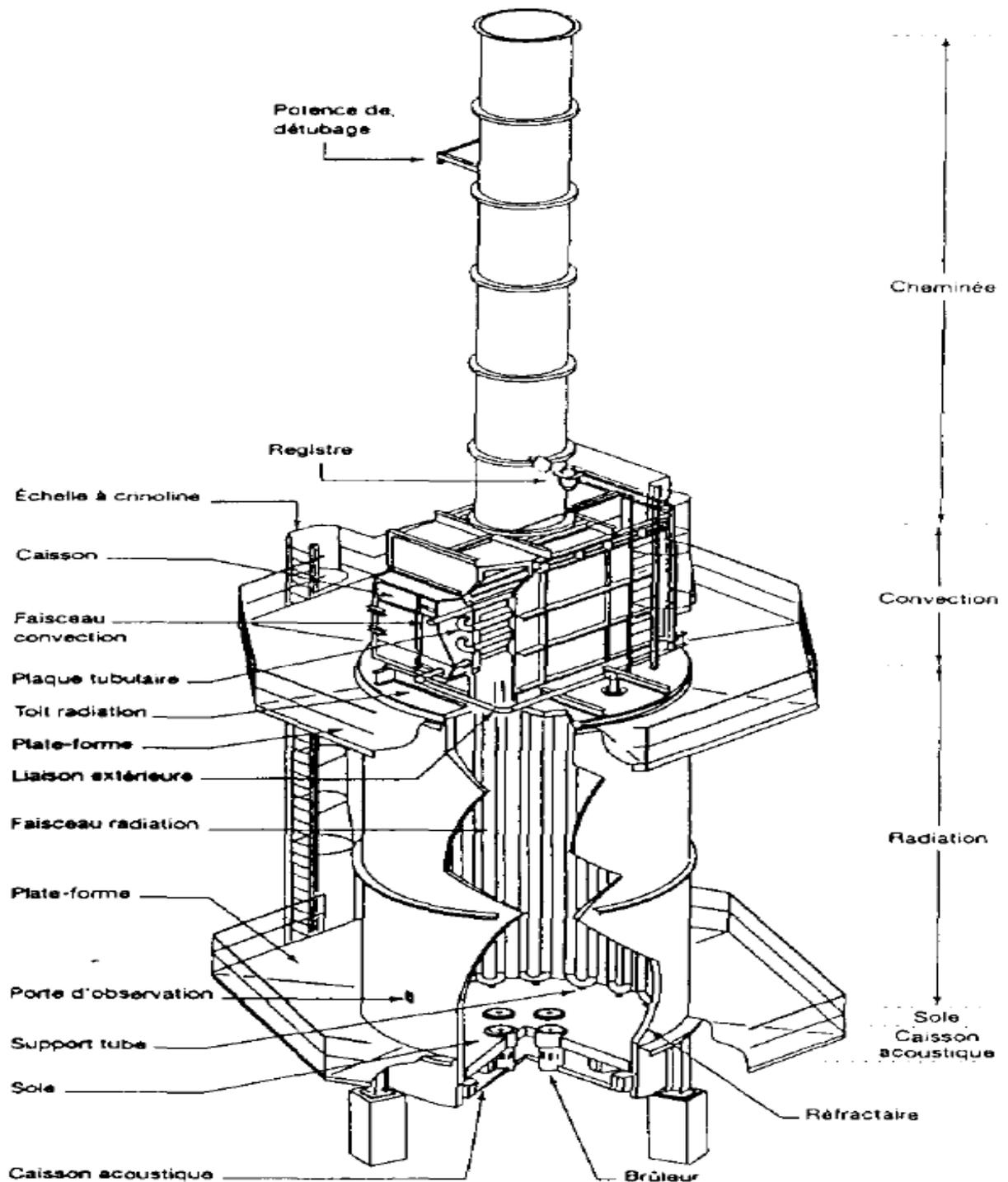


Figure 14 : Four cylindrique vertical

XX. TECHNOLOGIE D'UN FOUR CLASSIQUE

Le concept de base d'un four est illustré à la figure 15, ci-dessous. La chaleur est libérée par la combustion du combustible avec l'air (ou l'oxygène) ou par l'énergie électrique, et une partie de cette chaleur est transférée au produit.

La chaleur restante part dans les fumées de combustion par les ouvertures telles que la cheminée, ou est perdue par la surface extérieure.

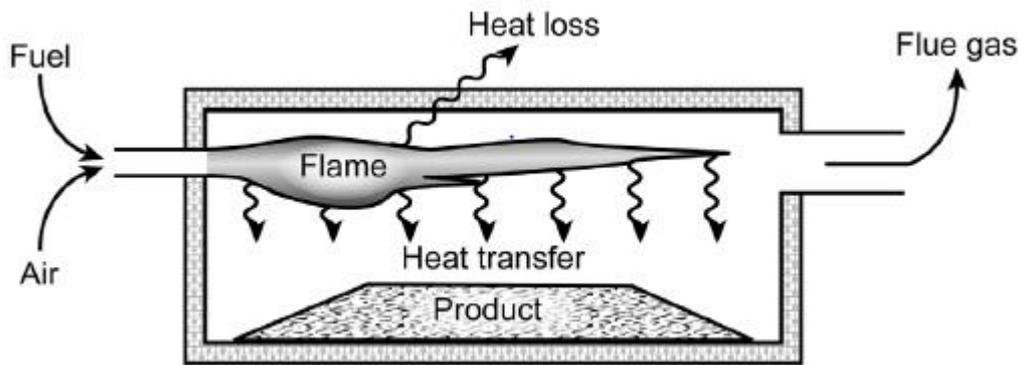


Figure 15 : schéma de principe d'un four

Ici on a un diagramme plus représentatif des constituants d'un four classique.

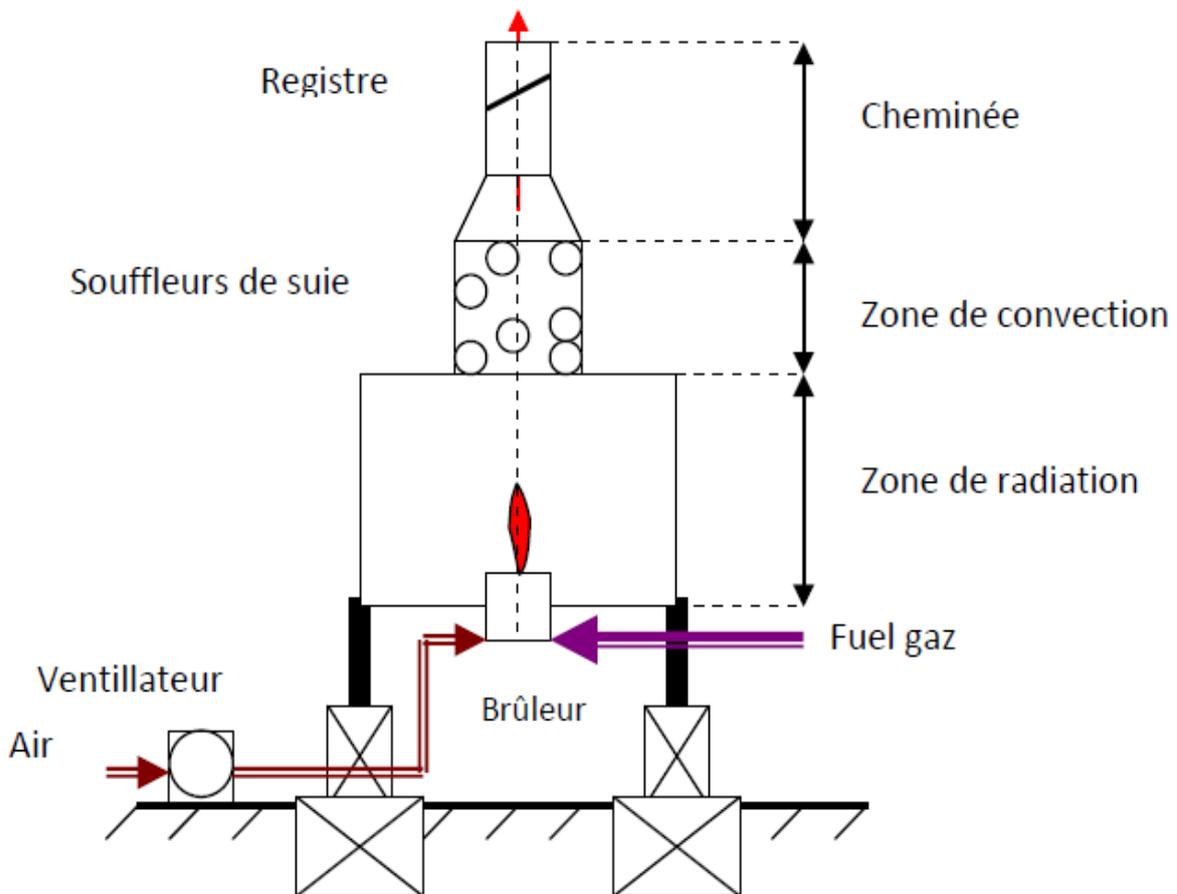


Figure 16 : Schéma simplifié d'un four classique

XX.1 Éléments Constitutifs D'un Four Classique :

- 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,
- 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.

XX.2 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.

XX.3 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.

XX.4 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.

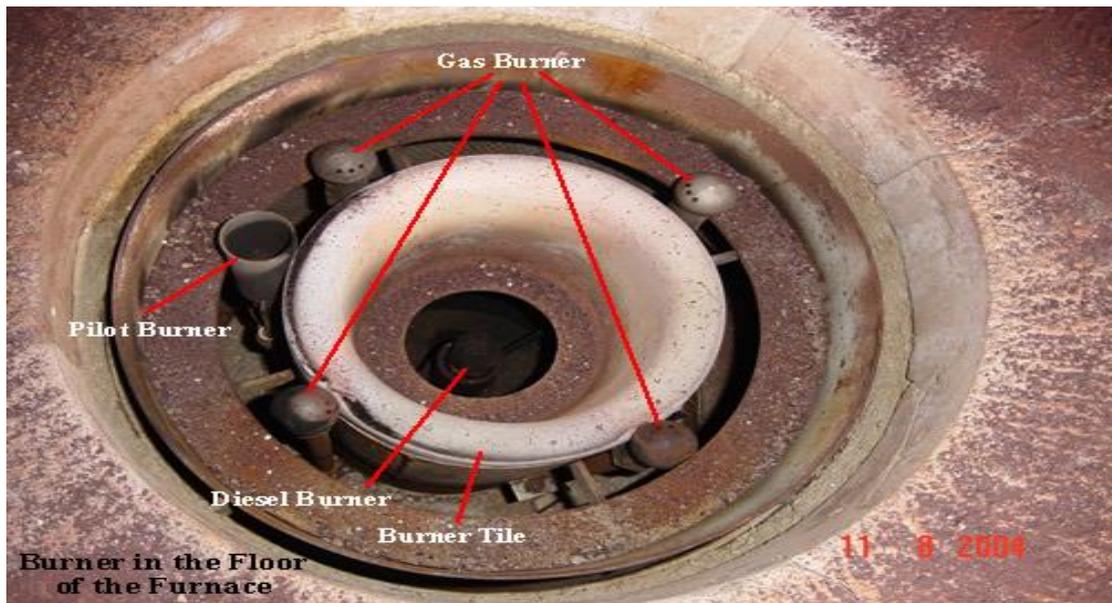


Figure 17 : image réel d'un brûleur

XX.5 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.

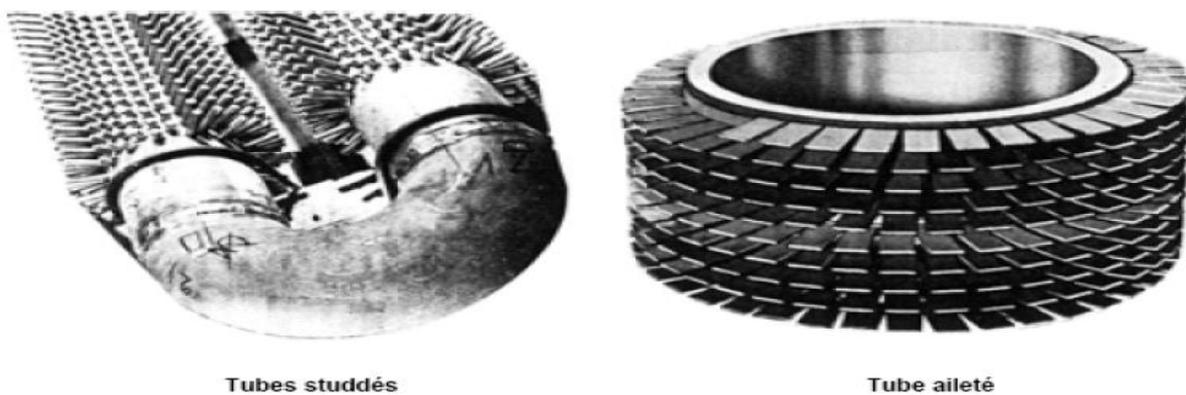


Figure 18 : types de tubes

XX.6 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.

XX.7 Garnissage Réfractaire :

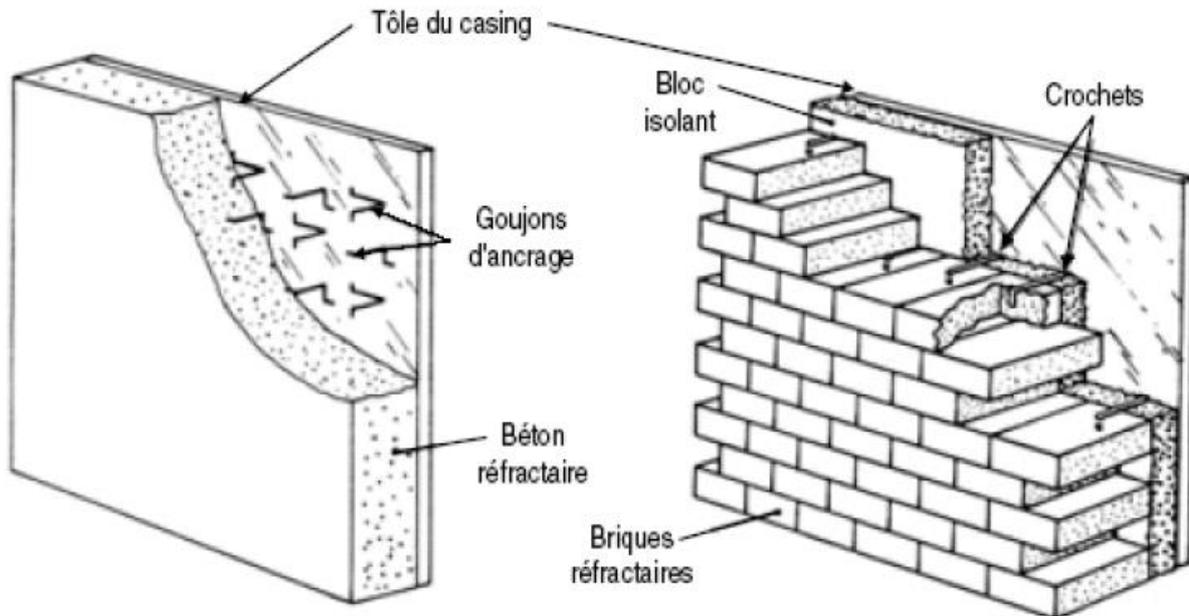


Figure 19 : Représentation du garnissage réfractaire

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.

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. La figure ci-dessous montre des exemples d'ancrage au casing de béton et briques réfractaires.

XX.8 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).
- 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. Ses dimensions, hauteur et diamètre, doivent donc être calculées pour obtenir ce tirage.

XX.9 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.

XX.10 Equipements De Chauffe :

Les équipements de chauffe comprennent :

- Les brûleurs,
- Les appareils de contrôle, y compris ceux incorporés dans la chaîne de sécurité,
- Les appareils de mesure et de régulation,
- Les vannes de réglage et d'isolement,
- Les tuyauteries.

Les brûleurs, partie principale de l'équipement de chauffe, sont chargés de réaliser le mélange intime air – combustible contribuant à la bonne qualité de la combustion. Ils sont munis d'un dispositif d'allumage automatique et de pilotes pour faciliter leur allumage et assurer un rallumage en cas d'extinction accidentelle. Ils sont aussi équipés d'un dispositif de contrôle de flamme qui, en cas d'extinction, coupe l'alimentation du combustible et actionne

une alarme lumineuse ou sonore selon le besoin. La pression au droit des pilotes est de 200 à 300 g/cm². Ils ont, en général, une alimentation indépendante du circuit des brûleurs principaux afin d'assurer leur fonctionnement continu. Les pressions de combustibles au droit des brûleurs sont différentes suivant la nature du combustible et le type de brûleur. Une pression de 5 à 6 bars est nécessaire aux brûleurs à air induit avec des combustibles liquides, alors qu'elle se situe entre 7 et 20 bars avec des brûleurs à air soufflé.

XXI. DIFFERENTS TYPES DE BRULEURS :

Les brûleurs peuvent être classés selon le combustible ou selon la circulation de l'air de combustion. (7)

XXI.1 Classification Selon Le Combustible :

Les brûleurs sont conçus pour brûler soit du gaz, soit de l'huile, soit les deux (mixtes).

- a) **Brûleurs à gaz** : on distingue deux types, ceux à prémélange (à air induit) et ceux sans prémélange. Dans les brûleurs à prémélange, une partie de l'air de combustion est mélangé au combustible avant que celui-ci ne débouche au nez du brûleur. Ce prémélange permet d'obtenir une combustion plus rapide, mais ce type de brûleurs ne peut être utilisé sur les gaz dans lesquels la vitesse de propagation de la flamme est très élevée (gaz riche en hydrogène). Alors que dans les brûleurs sans prémélange, l'air de combustion entre dans le brûleur parallèlement au jet de gaz et diffuse lentement dans celui-ci. Ils donnent une flamme plus longue et plus lumineuse que ceux à prémélange.

Remarque : les brûleurs à gaz sont utilisés lorsqu'on a la certitude de ne jamais manquer de combustible (gaz naturel).

- b) **Brûleurs à combustible liquide** : le combustible liquide (huile) est pulvérisé avant de se mélanger avec l'air de combustion. La pulvérisation est soit mécanique soit à l'aide de la vapeur d'eau. Les brûleurs à pulvérisation par vapeur d'eau sont les plus utilisés. La vapeur utilisée doit être légèrement surchauffée afin d'éliminer toutes gouttelettes en suspension. La pression de la vapeur est supérieure de 1 à 1,5 bars à la pression du combustible. Le débit de vapeur nécessaire est proportionnel au débit du combustible.
- c) **Brûleurs mixtes** : ils peuvent être alimentés soit en combustible gazeux, soit en combustible liquide.

XXI.2 Classification Selon La Circulation D'air :

Les brûleurs peuvent être à air induit par tirage naturel ou à air forcé.

- a) **Brûleurs à air induit par tirage naturel** : leurs qualités sont la robustesse, l'exploitation facile, le fonctionnement avec de larges variations de % d'air de combustion sans influence sur le rendement de la combustion, la faible sensibilité aux variations des caractéristiques des combustibles, la technologie simple et le prix de revient intéressant.

- b) **Brûleurs à air forcé** : l'air de combustion est amené sous pression à travers une gaine à l'aide de ventilateurs. Les pressions des combustibles aux brûleurs sont différentes suivant leur nature et le type de brûleur. La pression recommandée est de 5 à 6 bars pour les brûleurs à air induit avec des combustibles liquides et 7 à 20 bars pour les brûleurs à air forcé avec des combustibles liquides.

Les brûleurs fonctionnent avec des excès d'air très variables :

- Avec des brûleurs à air induit par tirage naturel : 25 à 40% d'excès d'air pour les combustibles liquides et 20 à 25 % pour les combustibles gazeux.
- Avec des brûleurs à air forcé : 10 à 15% avec tous les combustibles.

XXI.3 Surveillance Des Brûleurs :

Une surveillance visuelle des brûleurs est indispensable pour détecter ceux qui fonctionnent mal. La forme et la couleur de la flamme donnent de précieux renseignements. Les flammes instables rouges et fumeuses amèneront à régler l'admission, à vérifier la pression et la température du combustible.

XXII. LES PRECHAUFFEURS D'AIR

Nous allons voir ici tout ce qui concerne cette nouvelle technologie implémenter dans les systèmes opératoires des fours modernes.

XXII.1 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 % - 15%) 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.

XXII.2 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 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.

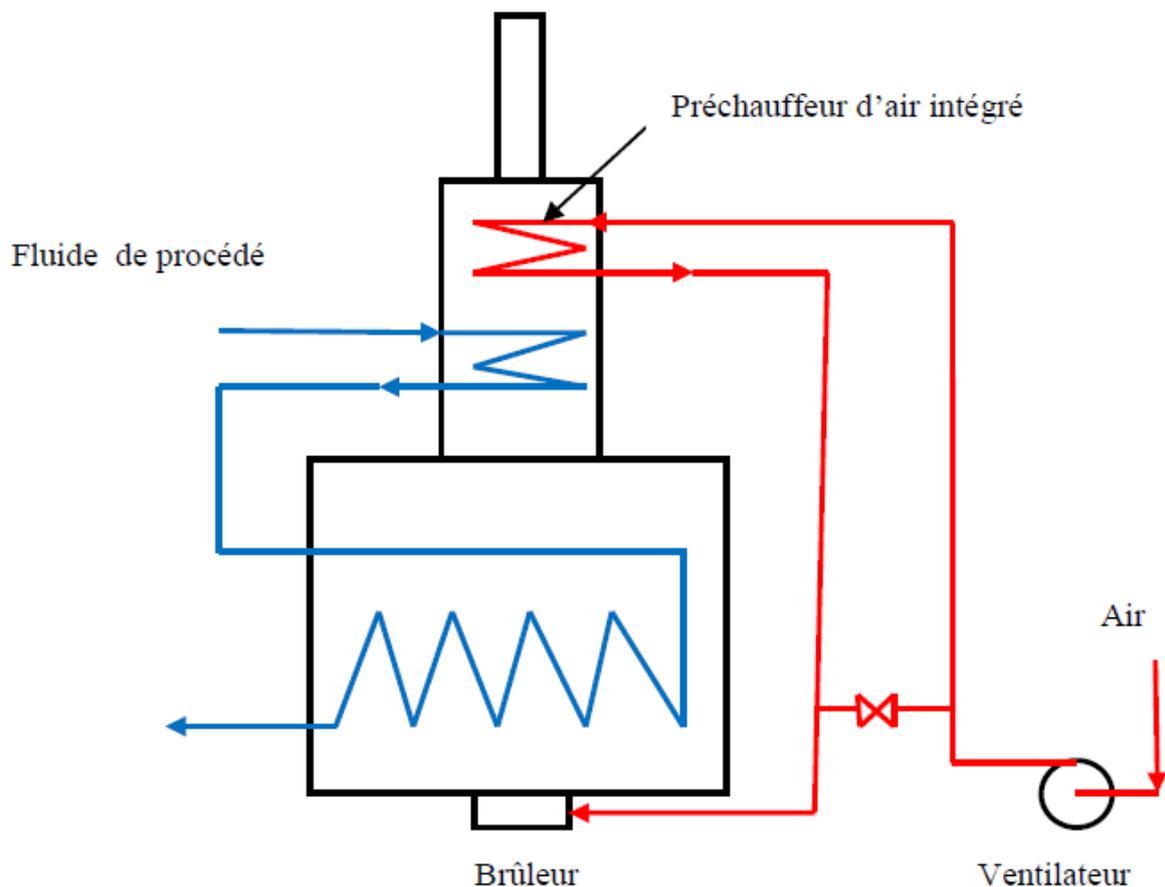


Figure 20 : schéma d'un préchauffeur d'air intégré (interne)

b) Préchauffeur d'air séparé

Deux principaux types se trouvent sur le marché :

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

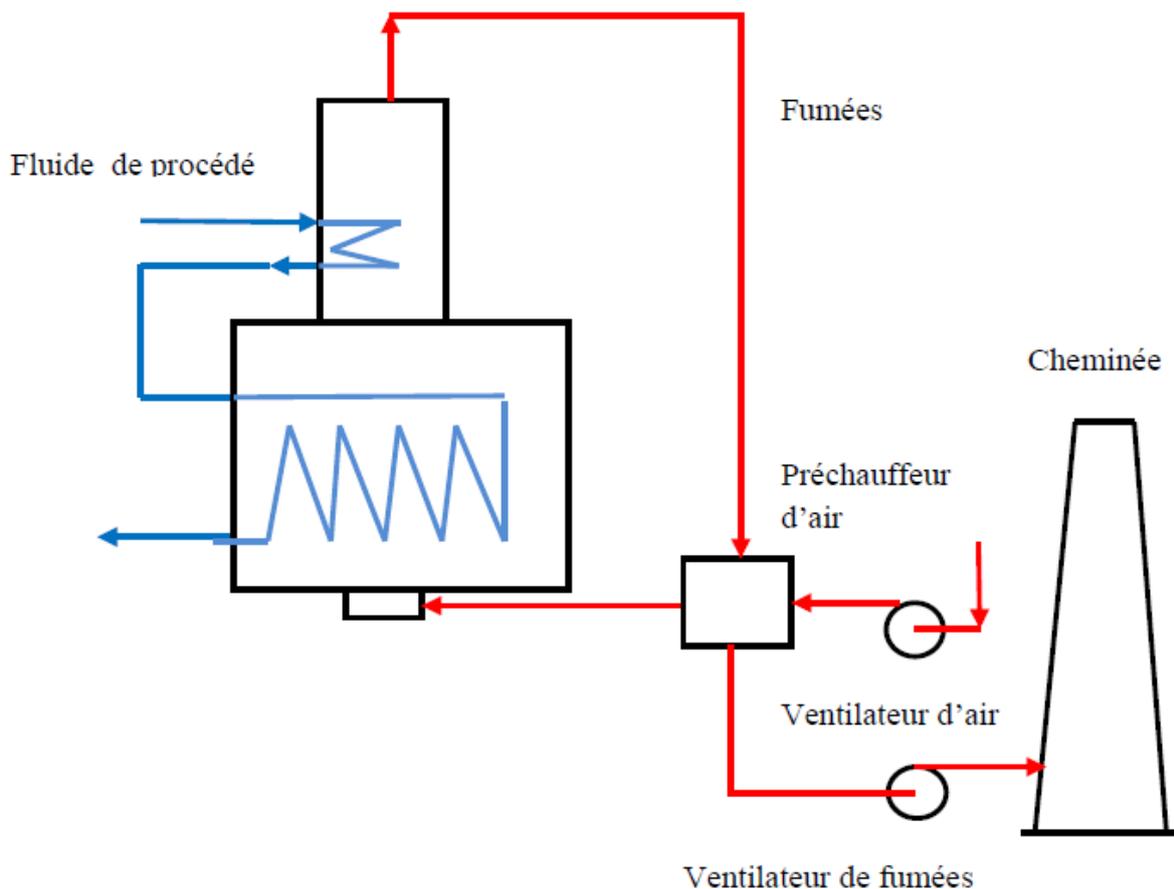


Figure 21 : schéma d'un préchauffeur d'air séparé (externe)

XXII.3 Avantages Et Inconvénients Du Préchauffage De L'air :

Avantages du préchauffage d'air :

- 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.

Inconvénients du préchauffage d'air :

L'augmentation de la température de flamme est le principal facteur de la formation de NO_x, cet élément est un polluant qui contribue aux pluies acides. On peut maintenir les émissions de NO_x en dessous 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 NO_x augmente rapidement, et il pourrait être nécessaire de se procurer d'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 NO_x et le coût.

XXIII. RENDEMENT THERMIQUE D'UN FOUR

Dans ce qui suit nous allons définir ce qu'est le rendement thermique d'un four, les paramètres qui influencent ce dernier ainsi que les différentes possibilités pour l'améliorer.

XXIII.1 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. (6)

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

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 :

- **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 grandes puissances thermiques 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.

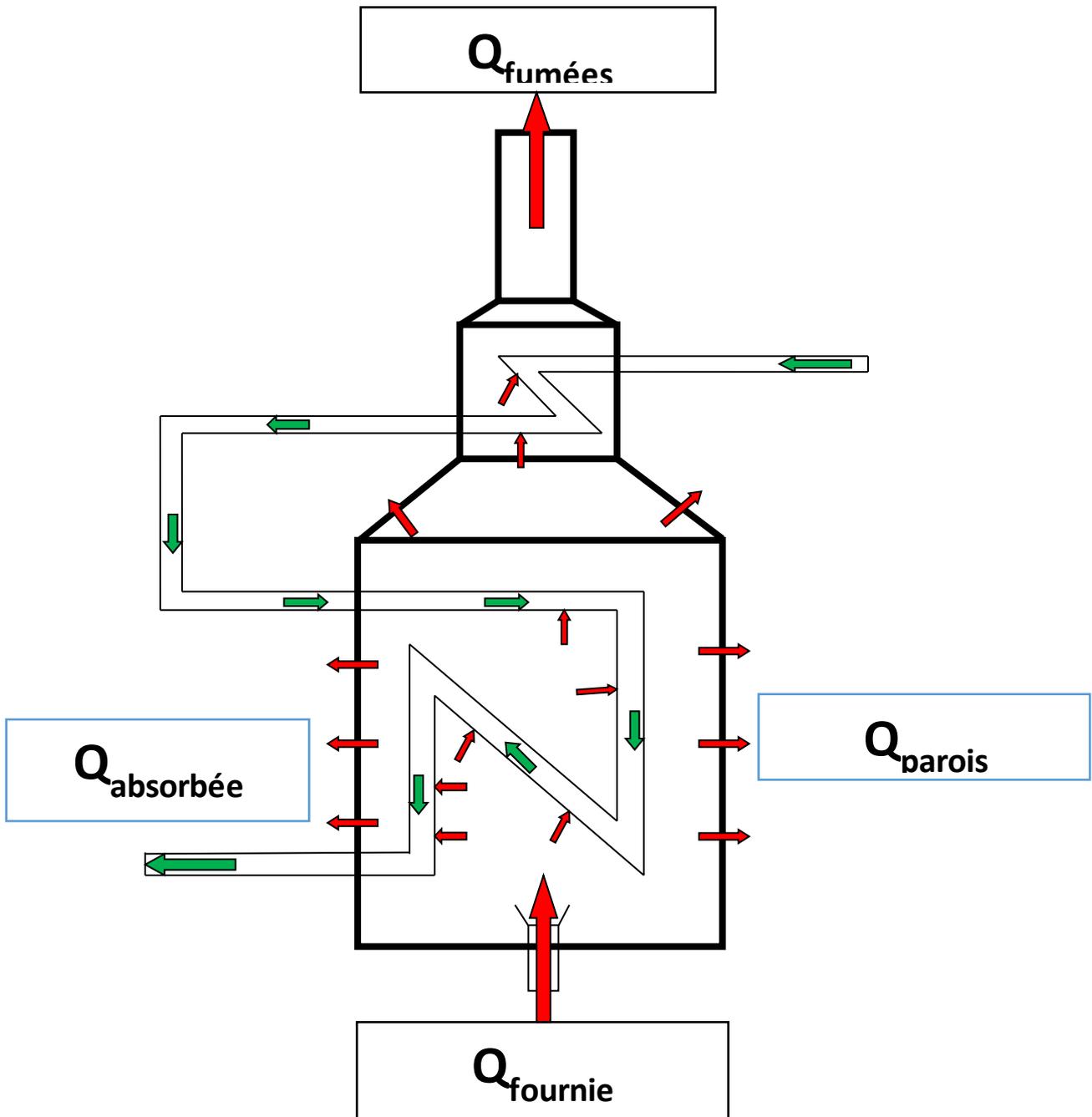


Figure 22 : Schéma représentatif des pertes de chaleur dans un four industriel

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) 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 ($Q_{\text{entrée}}$).

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

En utilisant le bilan thermique du four, le débit de chaleur absorbée peut encore s'exprimer :

$$Q_{\text{absorbée}} = Q_{\text{entrée}} - Q_{\text{fumées}} - Q_{\text{parois}}$$

Alors l'expression du rendement devient :

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

XXIII.2 Paramètres Influant Le Rendement D'un Four :

Les pertes par les fumées dépendent de deux paramètres :

L'excès d'air de combustion : il accroît le débit de fumées et diminue le rendement du four. En effet, le débit d'air excédentaire consomme de l'énergie libérée aux brûleurs pour s'échauffer de la température ambiante à celle de rejet des fumées. Les pertes par les fumées dues à l'excès d'air peuvent être estimées par la relation approchée :

$$\% \text{ de pertes aux fumées du à l'excès d'air} = \frac{\text{Teneur en oxygène des fumées} (\%)}{2}$$

La température de rejet des fumées : elle est d'autant plus élevée que la récupération d'énergie est moins bonne et donc le rendement du four plus faible. Les pertes par les fumées dues à leur température de rejet peuvent être estimées par la relation approchée :

$$\% \text{ de pertes aux fumées du à leur température de rejet} = \frac{\text{Température des fumées} (^\circ\text{C})}{20}$$

Les pertes par les parois peuvent être estimées à 2 %.

XXIII.3 Possibilités Et Limites A L'amélioration Du Rendement D'un Four :

L'expression indirecte du rendement d'un four montre que celui-ci est affecté par deux types de pertes : les pertes par les parois et les pertes par les fumées. L'amélioration du rendement repose sur la réduction de ces pertes.

Réduction des pertes aux parois : Ces pertes peuvent être réduites par l'accroissement de l'isolation thermique. Cependant, leur niveau actuel étant faible (1 à 2 %), l'intérêt économique de cette solution est relativement limité.

Réduction des pertes par les fumées :

- a) **Réduction de l'excès d'air** : cette réduction permet l'économie de combustible utilisé pour réchauffer l'air en excès de la température ambiante à la température des fumées. Cependant, elle rencontre comme limite l'apparition d'imbrûlés dans les fumées auxquels correspondent :
- Une perte de chaleur de combustion (nouveau type de diminution du rendement) ;
 - Un encrassement de la zone de convection réduisant son efficacité ;
 - Un risque de post-combustion des imbrûlés présentant un danger pour le personnel et le matériel.

Les équipements de contrôles permettant d'apercevoir l'apparition d'imbrûlés dans les fumées sont l'opacimétrie dans le cas de combustibles liquides et l'analyseur de CO dans le cas de combustible gazeux.

- b) **Abaissement de la température des fumées** : c'est le moyen le plus efficace d'amélioration du rendement du four ; un abaissement de 20°C de la température des fumées correspond à un gain de rendement de l'ordre de 1 %. L'obtention de plus basses températures aux fumées peut être réalisée par :
- L'extension de la surface de convection sur le fluide de procédé ;
 - La mise en place d'un service supplémentaire en zone de convection, par exemple une génération de vapeur. Cette solution ne présente d'intérêt que si le débit de vapeur produite n'est pas trop faible (au moins 4 t/h) et que le besoin de vapeur existe dans l'usine ;
 - Le préchauffage de l'air de combustion.

Dans le cas où le combustible contient du soufre, l'abaissement de la température de rejet des fumées rencontre comme limite le point de rosée acide à partir duquel apparaissent les problèmes de corrosion sulfurique des surfaces métalliques d'échange. La température de rosée acide des fumées constitue la température minimale de rejet des fumées. Le diagramme ci-dessous indique l'évolution de la température de rosée acide des fumées en fonction de la teneur en soufre du combustible et de la teneur en oxygène des fumées. (6)

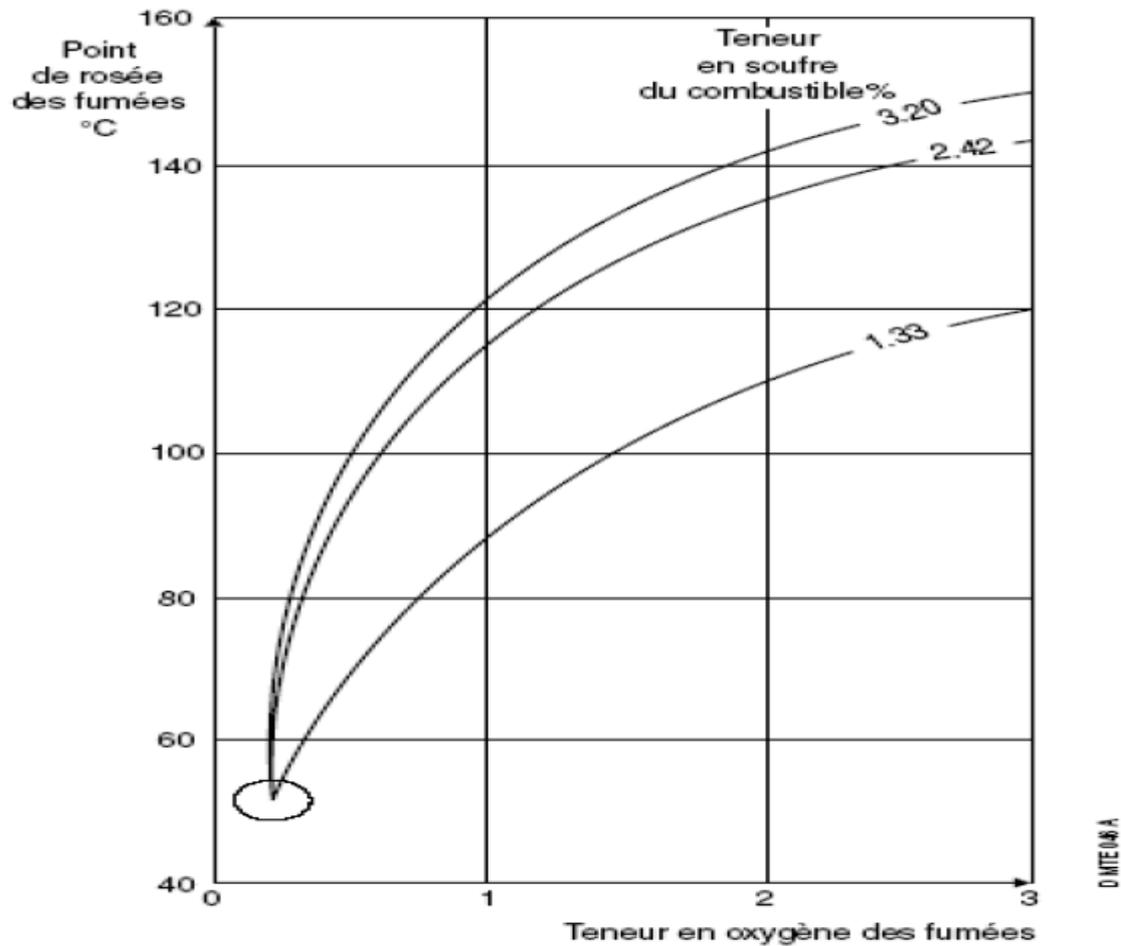


Figure 23 : Diagramme représentant l'évolution de la température de rosée acide des fumées en fonction de la teneur en soufre du combustible et de la teneur en oxygène des fumées (8)

XXIV. CONTROLE CONTINUE DU FOUR

Une surveillance régulière des équipements et des paramètres opératoires d'un four permet de maintenir sa bonne marche dans les meilleures conditions de rendement et de sécurité. Cette surveillance est nécessaire car elle permet de détecter les anomalies et de rectifier les réglages. Pour que la surveillance, les réglages et l'intervention en cas d'incidents s'effectuent en sécurité, l'ordre et la propreté doivent régner aux abords du four.

Cette partie concernant les procédures de contrôle des fours avant et après démarrage est détaillée dans la section des annexes. (Annexe 1)

Dans le diagramme suivant on a résumé les étapes essentielles dans le processus de démarrage des fours de façon générale.

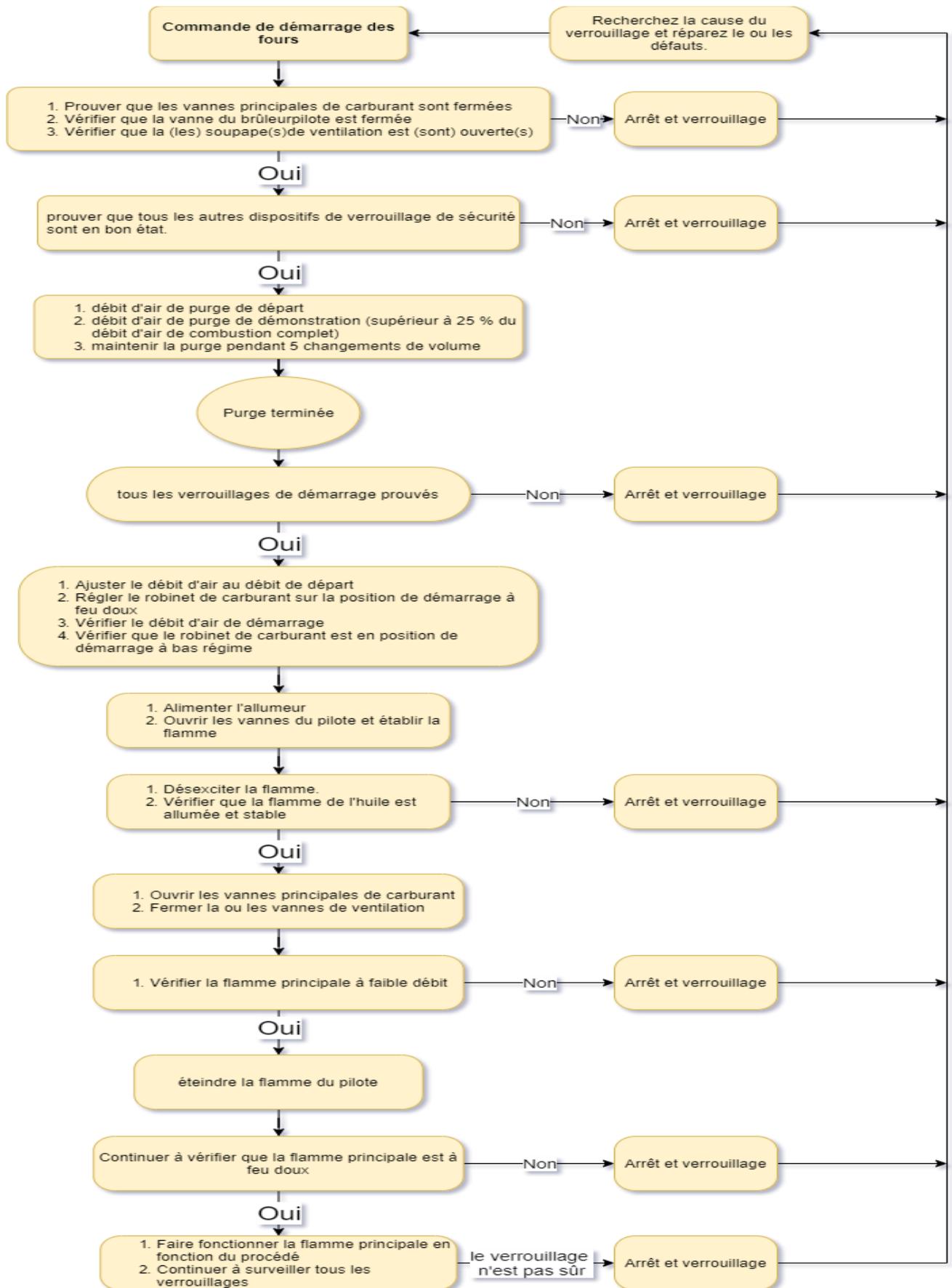


Figure 24 : Séquence de démarrage typique d'un four (la configuration réelle va varier selon l'application du four)-

XXV. FOURS DU TOPPING CONDENSAT DE SKIKDA

XXV.1 Fonctionnement :

La raffinerie de condensat RA2K comporte trois fours 100-F-101, 100-F-102 et 100-F-103 dont les caractéristiques principales sont données dans les tableaux ci-après. 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.

Le principe de fonctionnement des trois fours avec préchauffeur, circuits gaz combustible, air de combustion et fumées, est représenté par le schéma suivant :

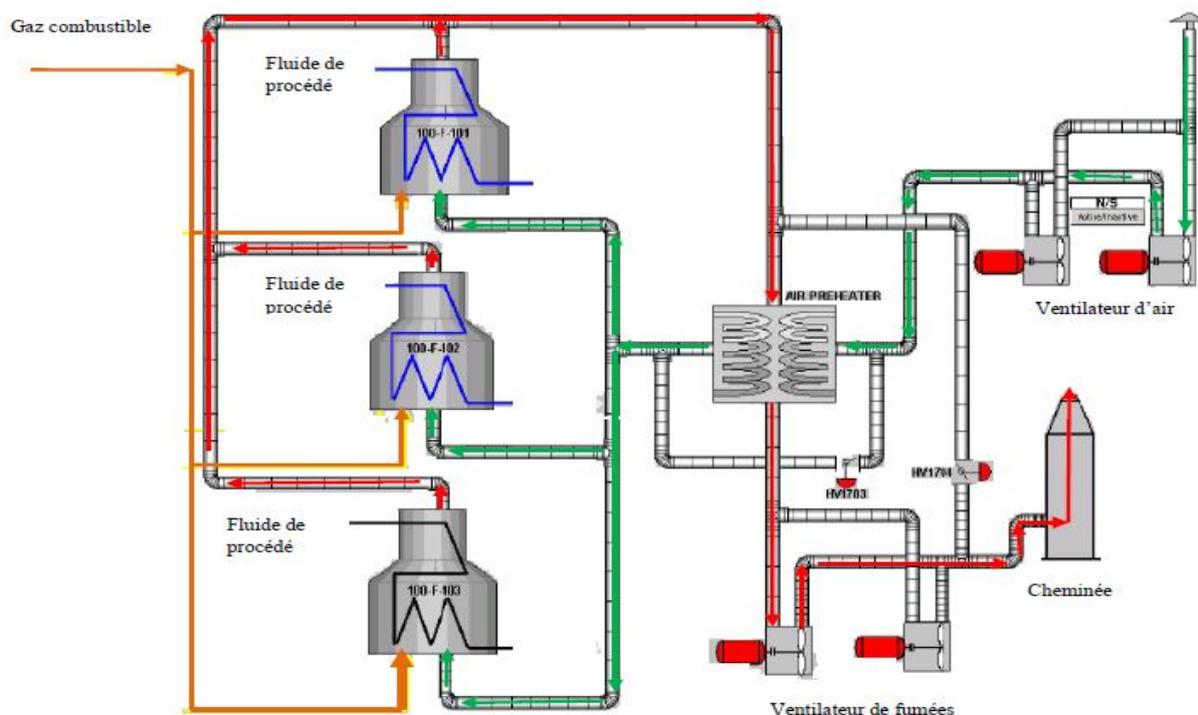


Figure 25 : Représentation des fours de la section de distillation RA2/K unité 100



Figure 26 : Image réelle des fours et du préchauffeur d'air de l'unité 100

XXV.2 Constituants Des Fours De L'unité 100 Ils Constituent Par :

- Un faisceau tubulaire en zone de radiation et en zone de convection ;
- Une zone de rayonnement formant la chambre de combustion garnie intérieurement de matériau réfractaire isolant ;
- Une zone de convection éventuellement garnit également ;
- Une cheminée ou un carneau pouvant être garnis avec registre ;
- Les accessoires divers tels que : portes d'accès, portes d'explosion, regards, analyseur d'oxygène, les thermocouples et connexion diverses pour la bonne conduite du four ;
- Charpente métallique ;
- Un équipement de chauffe comprenant des brûleurs situés à la base ou sur les côtés de la chambre de combustion, avec son appareillage ;
- Garnissage réfractaire.



Figure 27 : Image réelle de la zone de radiation du four 100-F-103

XXV.3 Brûleurs :

Les brûleurs des trois fours sont du type brûleurs à combustible gazeux. Ils peuvent fonctionner dans diverses conditions d'air de combustion et ils sont adaptés pour un air ambiant en tirage naturel ou en tirage forcé. Ils sont également adaptés pour l'air préchauffé. Cette version particulière est prévue pour fonctionner en tirage forcé. Les brûleurs comprennent les pièces suivantes : (8)

- Un caisson ;
- Un registre d'air ;
- Un collecteur de gaz ;
- Huit becs ;
- Un pilote ;
- Un flexible d'alimentation de gaz ;
- Un voyant.

XXV.4 Garnissage Réfractaire

- **Charpente métallique** : fibre céramique.
- **Sole et cheminée** : béton réfractaire.

XXV.5 Répartition De La Charge De Chaque Four Dans Les Passes :

Le nombre de passes dans les fours F101, F102 et F103 est respectivement 6, 4 et 8. Le débit du fluide de procédé dans un four est généralement assez important ; il en résulte que le faisceau tubulaire doit offrir une grande surface d'échange pour permettre la transmission d'un débit de chaleur élevé et simultanément une grande section de passage pour limiter les pertes de charge. Ces deux contraintes conduisent à organiser la circulation du fluide en plusieurs courants parallèle traversant chacun le four dans un circuit distinct. Ces différents circuits sont appelés passes.

Pour obtenir une répartition homogène du produit dans les différentes passes, les passes sont réalisées de manière symétrique (longueur de tuyauteries, nombre de coudes, etc.).

XXVI. PRECHAUFFEUR D'AIR

XXVI.1 Description :

Le préchauffeur d'air du topping condensat est du type séparé et dynamique et comporte de tubes en fonte. Ce type de réchauffeur, même en présence de gaz corrosifs ou poussiéreux, travaille sans problème. La surface d'échange se compose de rangées horizontales et de colonnes verticales. Les tubes sont assemblés en quatre modules superposés dans lesquels l'axe des tubes est horizontal.

Le préchauffeur d'air contient trois passes coté air (tubes) et une passe coté fumées. Les effluents gazeux pénètrent dans le haut de la section la plus chaude (module supérieur) et s'écoule verticalement sur l'extérieur des tubes avant de quitter le réchauffeur d'air dans le bas de la section la plus froide (module inférieur). L'air pénètre dans le réchauffeur sur le côté du module de bas et s'écoule horizontalement dans les tubes (premier passage) et ensuite l'air continue son chemin à travers le deuxième et le troisième passage, l'air quitte le réchauffeur du côté opposé à l'entrée.

XXVI.2 Maintenance Du Préchauffeur D'air :

Pour garantir et maintenir des performances optimales au niveau des réchauffeurs d'air, il est essentiel de s'assurer que les composants sont périodiquement et soigneusement nettoyés. Dans le cas contraire, le système s'encrassera rapidement, augmentant les chutes de pression et diminuant le transfert de chaleur. Un nettoyage périodique des composants à l'aide d'un souffleur de suie efficace garantit un transfert de chaleur régulier et réduit les chutes de pression au niveau du système d'exploitation. On doit maintenir une température minimale du métal au moins supérieure de 10°C à celle du point de rosée des effluents gazeux. Si la température de sortie des effluents est inférieure à 143°C, il faut procéder à l'ouverture du by-pass d'air froid afin de protéger la fonte dans le module inférieur.

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

Tableau 5 : Caractéristiques du four 100-F-101

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		/

Tableau 6 : Caractéristiques du four 100-F-102

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	
Epaisseur 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	/	

Tableau 7 : Caractéristiques du four 100-F-103

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	/	

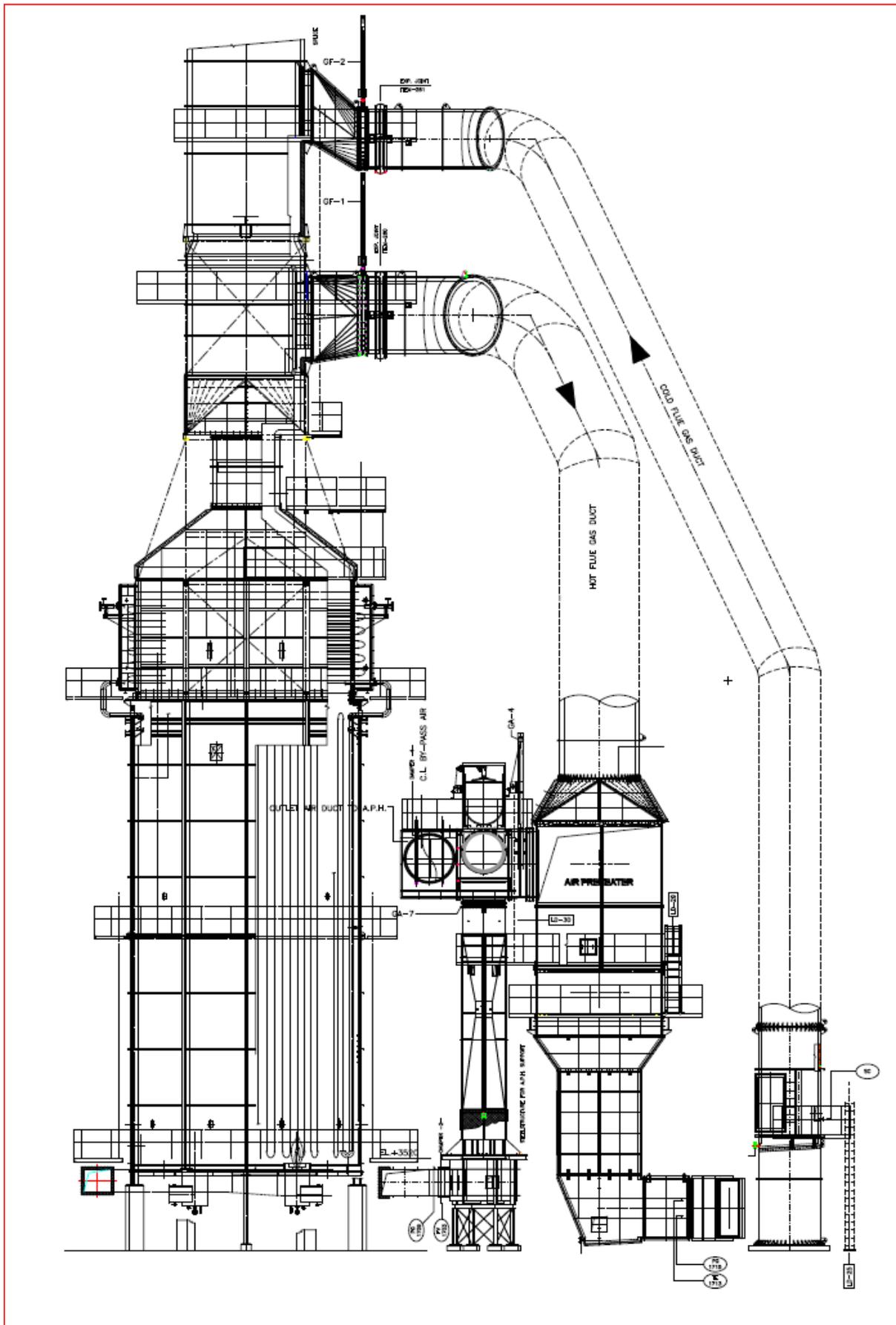


Figure 28 : Couplage four de l'unité 100 et le préchauffeur d'air

Chapitre IV

**Calcul Du Rendement Thermique
Des Fours Et Le Gain Obtenu**

PROBLÉMATIQUE

L'unité 100 comporte trois fours cylindriques munis d'une cheminée commune et d'un préchauffeur d'air commun. Cette nouvelle technologie est l'une des premières installations utilisées pour les fours des complexes de raffinage en Algérie.

Les trois fours fonctionnent avec un préchauffeur d'air en service, ce qui permet d'abaisser la température moyenne des fumées de 407 °C à 161 °C avant leur évacuation à l'atmosphère par la cheminée, représentant un abaissement de 246 °C. Ceci représente un abaissement considérable de la température des fumées à la sortie de la zone de convection de chaque four.

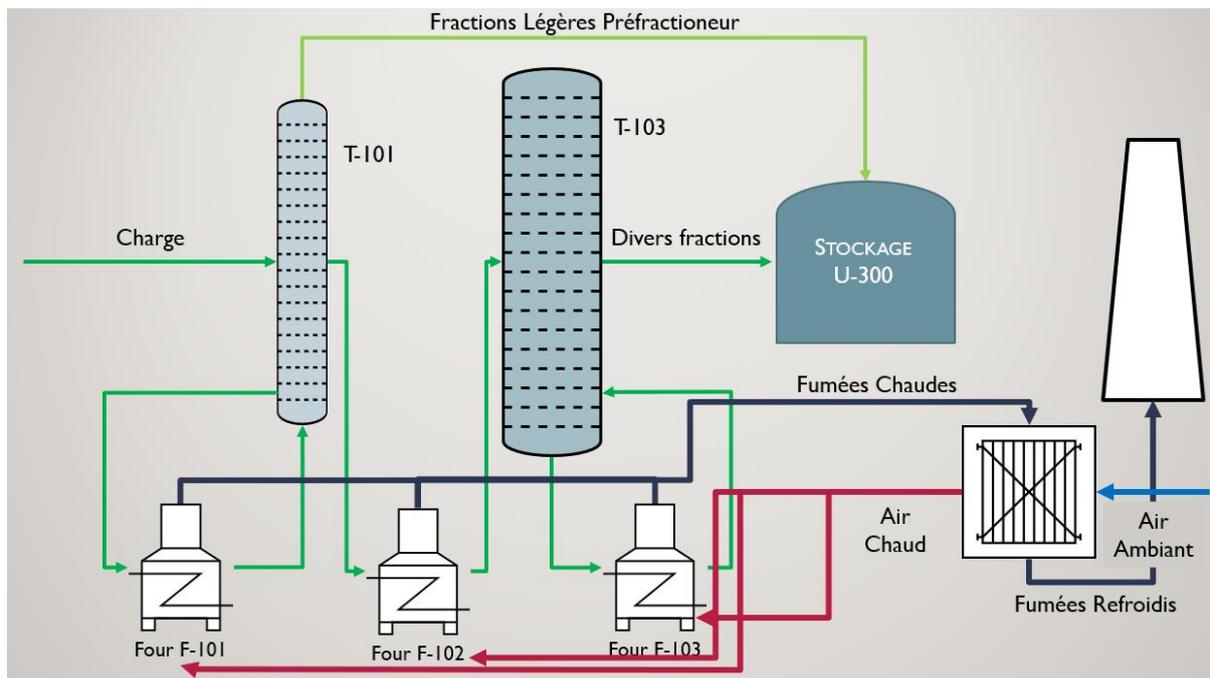


Figure 29 : Système de refroidissement des fumées des trois fours dans un économiseur commun

Les fumées, à la sortie de la zone de convection de chaque four, sont mélangées et refroidies dans le préchauffeur d'air (échangeurs à plaques) 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.

Notre étude consiste à déterminer :

- Le Rendement thermique des trois fours et de voir l'impact du réchauffage de l'air de combustion sur le rendement des fours ainsi que la consommation du combustible et la température des fumées sortie cheminées sans et avec préchauffage d'air de combustion et leur impact sur l'environnement et la durée de vie du four.

- Le Gain d'énergie obtenu par le fonctionnement des fours en utilisant un préchauffeur d'air de combustion pour un fonctionnement d'une année et sachant aussi que les trois fours travaillent 24 sur 24heures.

L'optimisation de la consommation d'énergie s'inscrit dans les objectifs de la réduction des coûts d'exploitation de l'entreprise et de la protection de l'environnement par la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES).

XXVII. INTRODUCTION :

Les fours sont des équipements vitaux pour tout site industriel, ils sont considérés comme le cœur des unités de raffinage ou de pétrochimie dont l'apport de l'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. (8)

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

- 1) Les fours de réchauffage de fluide sans changement d'état physique
- 2) Les fours de réchauffage de liquide avec vaporisation partielle
- 3) Les fours de réchauffage de fluide avec réaction chimique

Nos trois fours sont de type réchauffage de liquide avec vaporisation partielle F-101 et F-103 fours de rebouillage, F-102 four atmosphérique.

Dans notre four la charge reçoit de la chaleur latente pour atteindre le degré de vaporisation requis.

Les fours de l'unité de topping de condensat sont de types cylindriques verticaux avec les propriétés suivantes :

- Les brûleurs sont situés sur la sole du four.
- Les flammes se développent dans la zone de radiation dans laquelle les tubes sont chauffés par rayonnement.
- La récupération de chaleur à partir des fumées est poursuivie dans la zone de convection fonctionnant comme un échangeur tubulaire. Les fumées refroidies sont rejetées à l'atmosphère par l'intermédiaire de la cheminée.
- Au cours de son trajet dans le faisceau tubulaire, le fluide de procédé parcourt successivement les zones de convection et de radiation.
- La charpente métallique et l'enveloppe métallique du four (le casing) sont protégées de la chaleur par une isolation interne dont la sole est réalisée en béton réfractaire et les parois en fibres céramiques.

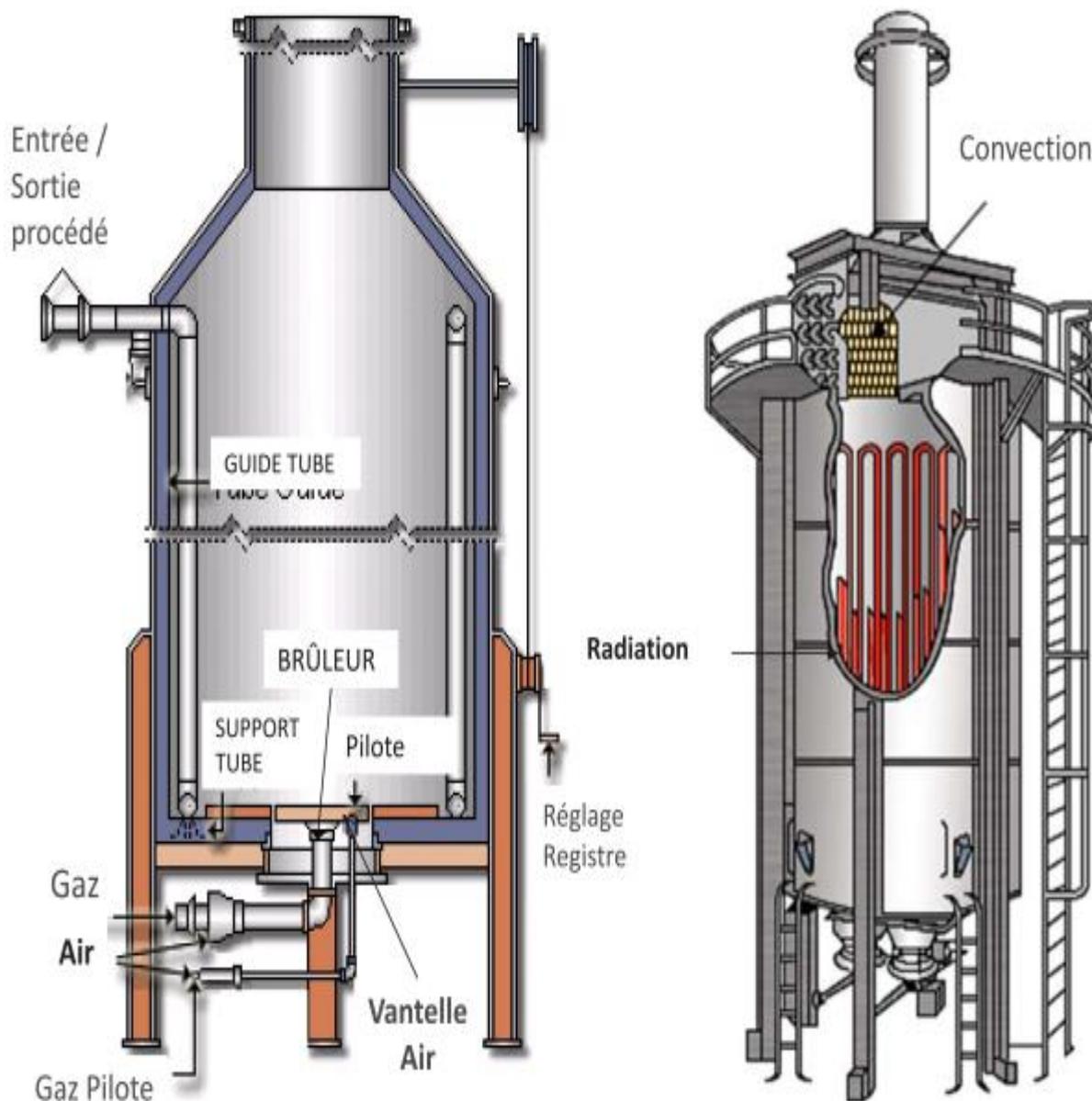


Figure 30 : Représentation des fours cylindriques et leur constituants.

XXVIII. FOURS DE TOPPING DU CONDENSAT :

XXVIII.1 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 °C à 244 °C ;
- 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 (évent) ;
- ESDV-1001 ;
- ESDV-1010 ;
- PV-1034.

La ligne des pilotes est disposée par les vannes suivantes :

- ESDV- 1006 (évent) ;
- ESDV-1002 ;
- PCV-1001.

XXVIII.2 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 à 216 °C ;
- 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 (évent) ;
- ESDV-1003 ;
- ESDV-1011 ;
- PV-1043 ;

La ligne des pilotes est disposée par les vannes suivantes :

- ESDV- 1008 (évent) ;
- ESDV-1004 ;
- PCV-1002 ;

XXVIII.3 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 à 361 °C ;
- 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 (évent) ;
- ESDV-1101 ;
- ESDV-1107 ;
- PV-1134.

La ligne des pilotes est disposée par les vannes suivantes :

- ESDV- 1104 (évent) ;
- ESDV-1102 ;
- PCV-1003.

XXVIII.4 Informations Concernant Le Désign :

Tableau 8 : Résumé des caractéristiques de design de chaque four.

Propriétés	F-101	F-102	F-103
Pression du design	1800,5 KPa (g)	1800,5 KPa (g)	1539,6 KPa (g)
Température design	382 °C	390 °C	492 °C
Capacité	30 m ³	28 m ³	53 m ³
Fluide d'exploitation	Prefractionator bottom	Prefractionator bottom	Atmospheric bottom
Poids total	55000 Kg	41000 Kg	90000 Kg
Test pressure	3577,4 KPa	3825,5 KPa	4686,6 KPa
Date du test	25/06/2008	08/06/2008	16/08/2008
Tolérance de corrosion	3,2 mm	3,2 mm	3,2 mm
Radiographie	10 %	10 %	100 %
Traitement	Non	Non	oui

XXIX. CALCUL DES RENDEMENTS THERMIQUES DES FOURS :

L'évolution du rendement thermique du four avec la durée de fonctionnement nous renseigne sur l'état de surface des tubes, des briques réfractaires, ainsi que la qualité de la combustion.

Comme on a vu précédemment dans le chapitre III celui des fours industriels, on peut calculer le rendement des fours en utilisant la méthode qui suit :

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

Ainsi en déterminant les pertes de chaleur par les fumées et avec une estimation des pertes de chaleurs par les parois nous pourrions avoir le rendement thermique des fours.

D'après le rapport de la dernière maintenance annuelle des fours **F-101**, **F-102**, **F-103** de l'unité 100, le matériau de la chambre de combustion et les briques réfractaires sont en bonne état. On pourra alors estimer les pertes de chaleurs par les parois de **2%**.

XXIX.1 Données :

Dans notre étude on considèrera un taux de marche de 100%.

Les paramètres opératoires des trois fours sont reportés dans les tableaux suivants :

Tableau 9 : Paramètres opératoires du four F-101

Four 100-F-101 (rebouilleur de la colonne de préfractionnement 100-T-101)		
Paramètres de combustion	Avec préchauffeur	Sans préchauffeur
T des fumées entrée préchauffeur d'air (°C)	388	438
T des fumées sortie préchauffeur d'air (°C)	161	438
Teneur en O2 dans les fumées (%)	3.76	3.50
T de l'air de combustion entrée préchauffeur d'air (°C)	25	25
T de l'air de combustion sortie préchauffeur d'air (°C)	250	25
Débit du gaz combustible (Nm3/h)	2830	3282
Fluide de procédé : fond de la colonne T101 (condensat stabilisé)		
Débit du fluide (t/h)	392.73	
Température d'entrée du fluide (°C)	186	
Température de sortie du fluide (°C)	222	
Humidité relative (%)	80	

Tableau 10 : Paramètres opératoires du four F-102

Four 100-F-102 (préchauffeur de la colonne de distillation atmosphérique 100-T-103)		
Paramètres de combustion	Avec préchauffeur	Sans préchauffeur
T des fumées entrée préchauffeur d'air (°C)	370	422
T des fumées sortie préchauffeur d'air (°C)	161	422
Teneur en O2 dans les fumées (%)	2.83	3.5
T de l'air de combustion entrée préchauffeur d'air (°C)	25	25
T de l'air de combustion sortie préchauffeur d'air (°C)	250	25
Débit du gaz combustible (Nm3/h)	2386	2902

Fluide de procédé : Charge de la colonne 100-T-103 (fond de la colonne de préfractionnement T101)	
Débit du fluide (t/h)	295.87
Température d'entrée du fluide (°C)	186
Température de sortie du fluide (°C)	204
Humidité relative (%)	80

Tableau 11 : Paramètres opératoires du four F-103

Four 100-F-103 (rebouilleur de la colonne de distillation atmosphérique 100-T-103)		
Paramètres de combustion	Avec préchauffeur	Sans préchauffeur
T des fumées entrée préchauffeur d'air (°C)	359	360
T des fumées sortie préchauffeur d'air (°C)	161	360
Teneur en O2 dans les fumées (%)	4.01	4.00
T de l'air de combustion entrée préchauffeur d'air (°C)	25	25
T de l'air de combustion sortie préchauffeur d'air (°C)	250	25
Débit du gaz combustible (Nm3/h)	1309	1550
Fluide de procédé : fond de la colonne T103 (gasoil lourd atmosphérique)		
Débit du fluide (t/h)	1200.87	
Température d'entrée du fluide (°C)	353	
Température de sortie du fluide (°C)	358	
Humidité relative (%)	80	

XXIX.2 Composition Du Gaz Combustible :

La détermination de la composition du gaz combustible a été réalisée à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse (méthode ASTM UOP 539)

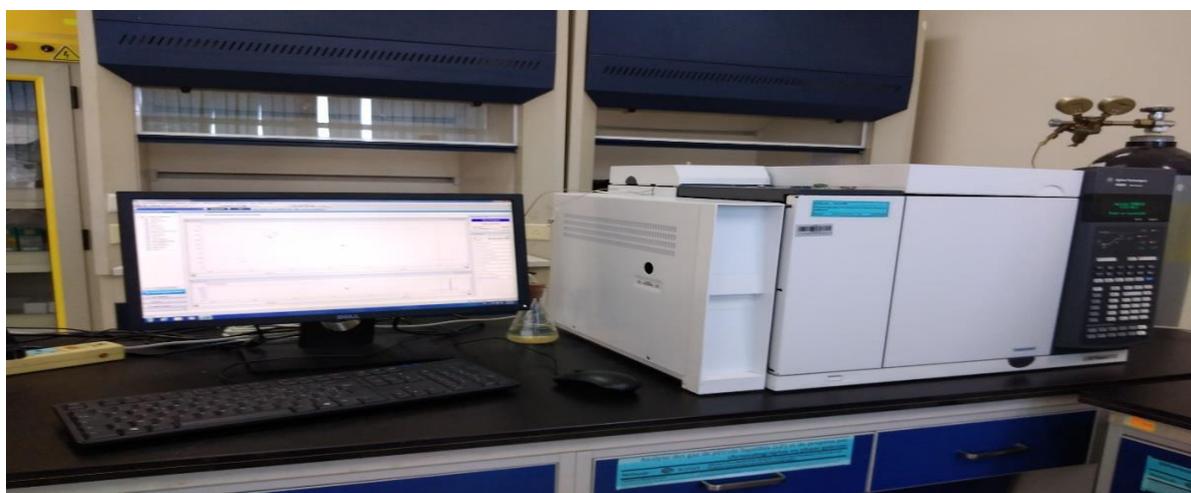


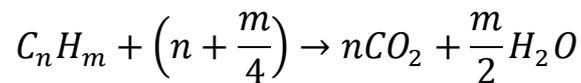
Figure 31 : chromatographe en phase gazeuse, laboratoire d'analyse RA2/K

Tableau 12 : Composition de notre gaz combustible (en % volumique)

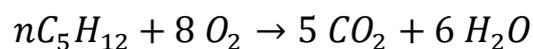
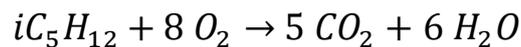
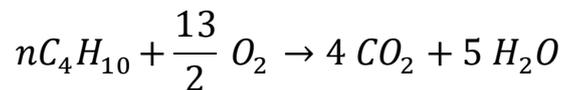
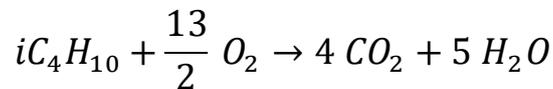
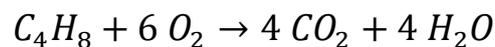
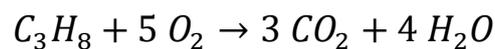
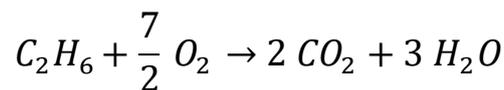
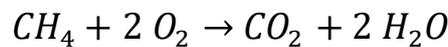
Constituants	Formule Chimique	% Volumique (yi)
Méthane	CH ₄	78.23
Ethane	C ₂ H ₆	6.45
Propane	C ₃ H ₈	1.98
Butène	C ₄ H ₈	0.19
I-butane	i-C ₄ H ₁₀	1.14
n-butane	n-C ₄ H ₁₀	7.07
i-pentane	i-C ₅ H ₁₂	0.32
n-pentane	n-C ₅ H ₁₂	0.47
Dioxyde de carbone	CO ₂	0.17
Azote	N ₂	3.98
TOTAL		100

XXIX.3 Réactions De Combustion :

On se basera sur la formule générale de la réaction de combustion :



On aura :



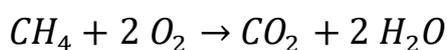
XXIX.4 Pouvoir Calorifique Inferieur (PCI) Des Constituants Du Gaz Combustible :

Tableau 13 : PCI des composants de notre gaz combustible

Constituants	Formule chimique	PCI (kcal /Nm3)
Méthane	CH ₄	8554.46
Ethane	C ₂ H ₆	15323.66
Propane	C ₃ H ₈	21795.98
Butène	C ₄ H ₈	27120.98
I-butane	i-C ₄ H ₁₀	28294.64
n-butane	n-C ₄ H ₁₀	28268.3
I-pentane	i-C ₅ H ₁₂	34893.3
n-pentane	n-C ₅ H ₁₂	34776.79
Dioxyde de carbone	CO ₂	0
Azote	N ₂	0

Exemple de calcul du PCI :

On a la réaction suivante de la combustion du méthane :



On a :

$$PCI = -\Delta H_{combustion}$$

Ou (loi de Hess) :

$$\Delta H_{combustion} = \sum x \Delta H_{formation}^{(PRODUITS)} - \sum y \Delta H_{formation}^{(RÉACTIFS)}$$

- X, y : le nombre stœchiométrique des produits et des réactifs respectivement.

Les $\Delta H_{formation}^{\circ}$ peuvent être tirées du tableau des enthalpies standard de formation (Annexe 2), dans notre cas les valeurs sont les suivantes :

Composé chimique	Masse molaire (g/mol)	$\Delta H_{formation}^{\circ}$ (kJ/mol)
CH ₄	16.043	-74.9
CO ₂	44.010	-393.52
H ₂ O _(gaz)	18.01528	-241.8
O ₂	32	0

$$\Delta H_{combustion} = (\Delta H_f^{CO_2} + 2 \Delta H_f^{H_2O}) - (\Delta H_f^{CH_4} + 2 \Delta H_f^{O_2})$$

$$\Delta H_{combustion} = (-393.52 + (2 \times -241.8)) - (-74.9 + 0) = -802.32 \text{ Kj/mole}$$

$$PCI_{CH_4} = 802.32 \text{ Kj/mole}$$

On sait que dans 1 Nm³ de CH₄ on a 44.61 moles de CH₄

$$1 \text{ Nm}^3 \rightarrow 44.61 \text{ mole de CH}_4$$

Donc pour 1 Nm³ on aura :

$$PCI_{CH_4} = 802.32 \times 44.61 = 35791.50 \text{ Kj/Nm}^3 = 8554.46 \text{ Kcal/Nm}^3$$

$$(1 \text{ kJ} \rightarrow 0,239006 \text{ kcal})$$

Ou on peut directement tirer les valeurs du PCI de chaque élément du gaz combustible à partir du tableau des valeurs calorifiques.

Tableau 14 : tableau des différentes valeurs empirique du PCS et PCI des éléments chimiques commun

Component	H2	CO	CH4	C2H6	C2H4	C2H2	Company
HHV	12.745	12.633	39.819	70.293	63.414		TU Wien
	12.769	12.622	39.781	69.693	63	58.059	NREL
	12.753	12.626	39.721	69.595	62.952		ECN
	12.766	12.641	39.847	70.402	63.998	58.975	DMT
	12.761	12.634	39.747	69.636	62.989	58.039	Carbona
	12.76	12.617	39.663	69.511	63.042	57.934	Univ. Sherbrook
	12.758	12.631	39.739				Vattenfall
	12.761	12.634	39.75	69.642	62.994	58.022	Nykomb
LHV	10.783	12.633	35.883	64.345	59.457		TU Wien
	10.788	12.622	35.814	63.748	59.036	56.078	NREL
	10.789	12.626	35.796	63.704	59.024		ECN
	10.8	12.6	35.8	63.71		56.03	Verenum
	10.757	12.641	35.787	64.333	59.938	56.924	DMT
	10.748	12.634	35.725	63.605	59.011	56.028	Carbona
	10.793		35.81				Vattenfall
	10.8	12.634	35.823	63.756	59.07	56.06	Nykomb
	10.797	12.635	35.821	63.749	59.068		TPS
	10.789	12.630	35.812	63.744	59.033	56.088	Bioelettrica
Component	C3H8	C3H6	i-C4H8	i-C4H10	n-C4H10	C6H6	Company
HHV	101.242	93.576	125.088	133.119	134.061		TU Wien
	99.091	91.879				142.893	NREL
						147.299	ECN
	101.794	94.343	121.843	131.972	133.981	146.329	DMT
	99.108	91.894		128.502		147.385	Carbona
	98.244					147.143	Univ. Sherbrook
99.116	91.902	120.696	128.207	128.513	147.398	Nykomb	
LHV	93.215	87.575	116.934	122.91	123.81		TU Wien
	91.163	85.934				141.41	NREL
						141.408	ECN
	93.548	88.191	113.806	121.592	123.517	140.301	DMT
	91.066	85.862		118.449		141.352	Carbona
	91.268	86.016	112.848	118.703	118.703	141.512	Nykomb
	91.164	85.925	113.371	117.668	118.569	159.502	Bioelettrica
Component	NH3	H2S					Company
HHV	13.072	25.105					ECN
		25.07					Kvaerner
	17.245	25.7					DMT
	17.094	25.123					Carbona
	25.096					Nykomb	
LHV	10.128	23.142					ECN
		23.12					Kvaerner
	14.189	23.69					DMT
	14.079	23.134					Carbona
	14.132	23.152					TPS
	14.136	23.113					Bioelettrica

Estimation du PCI du mélange gaz combustible :

$$PCI_{Gaz\ combustible} = \sum_i^n PCI_i \cdot y_i / 100$$

$$PCI_{Gaz\ combustible} = 10760\ Kcal/Nm^3$$

Quantité de chaleur libérée par la combustion (Q fournie) :

- V_c : débit du gaz combustible en Nm^3/h ;
- PCI : pouvoir calorifique inferieur du gaz combustible en $kcal/Nm^3$

Tableau 15 : Récapitulatif de la chaleur fournie par la combustion de notre gaz combustible (avec et sans APH)

Fours	Q fournie (kcal/h)	
	Avec préchauffeur d'air	Sans préchauffeur d'air
100-F-101	30 450 800	35 314 320
100-F-102	25 673 360	31 225 520
100-F-103	14 084 840	16 678 000

Exemple de calcul :

- Sans préchauffeur d'air :

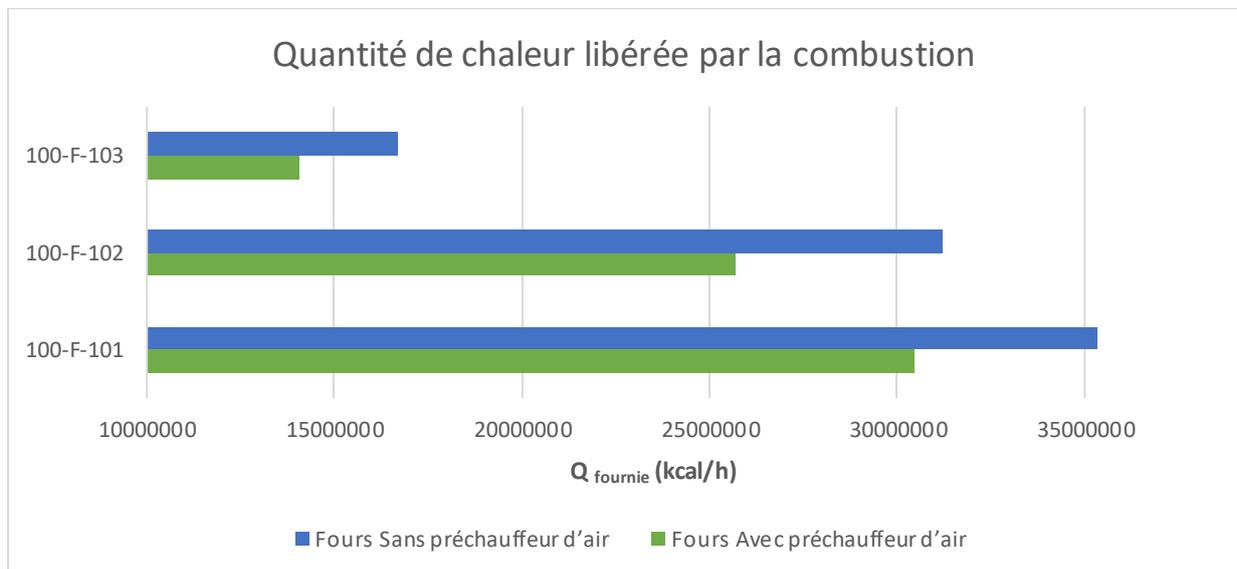
Le four 100-F-101 a un débit de combustible de $3282\ Nm^3/h$

$$Q_{fournie} = V_c \times PCI_{Gaz\ combustible} = 3282 \times 10760 = 35314320\ Kcal/h$$

- Avec préchauffeur d'air :

Le four 100-F-101 a un débit de combustible de $2830\ Nm^3/h$

$$Q_{fournie} = V_c \times PCI_{Gaz\ combustible} = 2830 \times 10760 = 30450800\ Kcal/h$$



XXIX.5 Composition Des Fumées

Afin de faciliter et de donner plus de clarté à nos calculs on prendra comme base 100 Nm³ de gaz combustible, par conséquent on déterminera les volumes suivants afin de connaître la composition théorique et réelle des fumées issues de la combustion complète de notre gaz combustible.

- $V_{CO_2}(\text{fumées}) = V_{CO_2}(\text{généré par la combustion}) + V_{CO_2}(\text{combustible}) ;$
- $V_{N_2}(\text{fumées}) = 3,76 V_{O_2}(\text{air de combustion}) + V_{N_2}(\text{combustible}) ;$
- $V_{H_2O}(\text{fumées}) = V_{H_2O}(\text{générée par la combustion}) + V_{H_2O}(\text{air de combustion}) ;$
- $V_{\text{air de combustion}} = 4,76 V_{O_2}(\text{air de combustion}).$

Pour le N₂ il est lié au volume de O₂, on prendra la composition standard de l'air de telle sorte que N₂ représente 79% et O₂ représente 21% de l'air. Par conséquent :

$$V_{N_2} = \frac{79}{21} \times V_{O_2} = 3.76 V_{O_2}$$

Pour $V_{\text{air de combustion}}$ en suivant la même logique que pour le N₂ on pourra déduire que l'air nécessaire pour la combustion complète de notre combustible est de :

$$V_{\text{air de combustion}} = \frac{100}{21} V_{O_2} = 4.76 V_{O_2}$$

En ce qui concerne la détermination de la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air de combustion on pourra la calculer à l'aide des données suivantes :

- Tension de vapeur de l'eau à 20°C : 17,4 mm Hg
- Humidité relative : 80 %
- Quantité d'eau dans l'air de combustion : $\frac{17.4 \times 0.8}{760 - 17.4} \times V_{\text{air}} = 0.018 V_{\text{air}}$

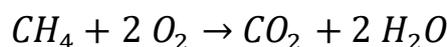
a) Composition théorique des fumées :

Selon les réactions de combustion précédentes et connaissant la composition du gaz combustible, nous pouvons déterminer les quantités (VCO₂, VH₂O et VN₂) nécessaires à la combustion théorique (neutre) de 100 Nm³/h de combustible. Les valeurs calculées sont notées dans le tableau suivant :

Tableau 16 : les différents volumes V_{CO_2} , V_{H_2O} et V_{N_2} dans chaque réaction de combustion de notre combustible.

Constituants	% Vol.	V_{O_2}	V_{CO_2}	V_{H_2O}
CH_4	78,23	156,46	78,23	156,46
C_2H_6	06,45	22,57	12,90	19,35
C_3H_8	01,98	9,90	5,94	7,92
C_4H_8	00,19	1,14	0,76	0,76
iC_4H_{10}	01,14	7,41	4,56	5,70
nC_4H_{10}	07,07	45,95	28,28	35,35
iC_5H_{12}	00,32	2,56	1,60	1,92
nC_5H_{12}	00,47	3,76	2,35	2,82
CO_2	00,17	/	/	/
N_2	03,98	/	/	/
Total	100,00	249,75	134,62	230,28

Exemple de calcul :



Dans cette réaction stœchiométrique 1 mole de CH_4 a besoin de 2 moles de O_2 pour donner 1 mole de CO_2 et H_2O . Vu que on a mis comme base de calcul 100 Nm^3 de combustible et on connaît la composition du gaz combustible grâce à l'analyse UOP 539 on peut dire que :

$$V_{O_2} = 78.23 \times 2 = 156.46 \text{ Nm}^3$$

La même chose s'applique aux autres constituants.

Donc, la combustion théorique de 100 Nm^3 de gaz combustible génère :

- $V_{CO_2} = 134,62 \text{ Nm}^3$
- $V_{H_2O} = 230,28 \text{ Nm}^3$

Avec :

- V_{O_2} (théorique) = $249,75 \text{ Nm}^3$
- $V_{N_2} = 3,76 \text{ VO}_2 = 939,06 \text{ Nm}^3$
- V (air théorique) = $1188,81 \text{ Nm}^3$

En considérant les quantités de CO_2 et de N_2 contenues dans le gaz combustible, on peut déterminer les quantités des constituants des fumées dont les valeurs sont reportées sur le tableau suivant :

Tableau 17 : La composition théorique des fumées

Constituants	V (Nm ³ /100 Nm ³ de combustible)	% Vol.
CO ₂	134,79	8,53
H ₂ O	252,51	15,98
O ₂	249,75	15,81
N ₂	943,04	59,68
Total	1580,09	100,00

b) Composition réelle des fumées (avec excès d'air) :

Dans le cas Des fours de l'unité 100 du complexe RA2/K l'excès d'air est de **15%** ce qui donne

$$\lambda = 1.15$$

- λ : Facteur d'excès d'air

Dans ce cas l'air de combustion totale est de :

$$V_{air\ réel} = V_{air\ theorique} \times \lambda = 1188,81 \times 1,15 = \mathbf{1367,1315\ Nm^3}$$

Soit X le volume de O₂ dans les fumées (provenant de l'excès d'air).

Soit Vf le volume total réel des fumées.

- VCO₂ (fumées) = VCO₂ (généré par la combustion) + VCO₂ (combustible) ;
- VO₂ (fumées) = X
- VN₂ (fumées) = 3,76 VO₂ (théorique) + VN₂ (combustible) + 3,76 X
- VH₂O (fumées) = VH₂O (générée par la combustion) + VH₂O (air de combustion réelle)
- Vair de combustion = 4,76 [VO₂ (théorique) + X]

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

Tableau 18 : Modèle mathématique de la composition réel des fumées

Constituants	V (Nm ³ /100 Nm ³ de combustible)
CO ₂	134,79
H ₂ O	252,51 + 0,087 X
O ₂	X
N ₂	943,04 + 3,76 X
Total	1330,34 + 4,849 X

D'après le modèle mathématique établie précédemment et la connaissance de la teneur d'oxygène présente dans les fumées on a pu déterminer la composition réelle des fumées dans chaque four.

Les résultats sont représentés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau 19 : Composition réelle des fumées du four F-101

Four 100-F-101				
Constituants	Avec préchauffeur d'air		Sans préchauffeur d'air	
	V (Nm3)	% Vol.	V (Nm3)	% Vol.
CO ₂	134,79	08,29	134,79	8,41
H ₂ O	257,95	15,85	257,50	16,07
O ₂	61,17	03,76	56,08	3,50
N ₂	1173,04	72,10	1153,90	72,02
Total	1626,95	100,00	1602,27	100,00

Tableau 20 : Composition réelle des fumées du four F-102

Four 100-F-102				
Constituants	Avec préchauffeur d'air		Sans préchauffeur d'air	
	V (Nm3)	% Vol.	V (Nm3)	% Vol.
CO ₂	134,79	08,74	134,79	8,41
H ₂ O	256,39	16,63	257,50	16,07
O ₂	43,64	2,83	56,08	3,50
N ₂	1107,13	71,8	1153,90	72,02
Total	1541,95	100,00	1602,27	100,00

Tableau 21 : Composition réelle des fumées du four F-103

Four 100-F-103				
Constituants	Avec préchauffeur d'air		Sans préchauffeur d'air	
	V (Nm3)	% Vol.	V (Nm3)	% Vol.
CO ₂	134,79	08,16	134,79	8,17
H ₂ O	258,40	15,65	258,39	15,66
O ₂	66,22	4,01	66,02	4,00
N ₂	1192,03	72,18	1191,28	72,17
Total	1651,44	100,00	1650,48	100,00

XXIX.6 Quantité De Chaleur Perdue Par Les Fumées ($Q_{Fumées}$) :

Elle est déterminée comme suit :

$$Q_{fumées} = n C_{p_{moy}} (T_f - T_0)$$

Avec :

- n : débit molaire des fumées
- $C_{p_{moy}}$: chaleur spécifique moyenne des fumées
- T_f : température de rejet des fumées

La température de référence considérée dans notre calcul est de $T_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$.

La chaleur spécifique moyenne des fumées est déterminée par la formule suivante :

$$C_{p_{moy}} = \sum_i^n C_{p_i} \cdot y_i / 100$$

Avec :

- $C_{p_{moy}}$: chaleur spécifique moyenne des fumées ;
- C_{p_i} : 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 $T^\circ\text{C}$ en kcal/kmole. $^\circ\text{C}$.

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	9,13	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.

Le débit des fumées est pris en kmoles/h.

Les quantités de chaleur perdues par les fumées dans les trois fours, avec et sans préchauffeur d'air sont reportées dans les tableaux suivants :

a) Avec préchauffeur d'air :

Dans ce qui suit on aura les tableaux des résultats de calcul de la quantité de chaleur perdue dans les fumées dans le cas où le préchauffeur d'air est opérationnel.

Tableau 22 : Quantité de chaleur perdue par les fumées F-101 (avec préchauffeur d'air)

Four 100-F-101			
Chaleur spécifique moyenne des fumées ($C_{p_{moy}}$)			
Constituants	C_{p_i} (kcal/kmole.°C)	Y_i	$C_{p_i} \cdot Y_i$
CO ₂	9,46	08,29	0,7842
H ₂ O	8,08	15,85	12,807
O ₂	7,11	03,76	0,2673
N ₂	6,99	72,10	50,398
$C_{p_{moy}}$ (kcal/kmole.°C)			73,720
Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{fumées}$)			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			161
Débit de gaz combustible (Nm ³ /h)			2830
Débit des fumées (kmoles/h)			2055,48
$Q_{fumées}$ (kcal/h)			2 439 633

Tableau 23 : Quantité de chaleur perdue par les fumées F-102 (avec préchauffeur d'air)

Four 100-F-102			
Chaleur spécifique moyenne des fumées ($C_{p_{moy}}$)			
Constituants	C_{p_i} (kcal/kmole.°C)	Y_i	$C_{p_i} \cdot Y_i$
CO ₂	9,46	08,74	0,8268
H ₂ O	8,08	16,63	13,437
O ₂	7,11	2,83	0,2012
N ₂	6,99	71,80	50,188
$C_{p_{moy}}$ (kcal/kmole.°C)			73,905
Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{fumées}$)			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			161
Débit de gaz combustible (Nm ³ /h)			2386
Débit des fumées (kmoles/h)			1642,45
$Q_{fumées}$ (kcal/h)			1 954 250

Tableau 24 : Quantité de chaleur perdue par les fumées F-103 (avec préchauffeur d'air)

Four 100-F-101			
Chaleur spécifique moyenne des fumées ($C_{p_{moy}}$)			
Constituants	C_{p_i} (kcal/kmole.°C)	y_i	$C_{p_i} \cdot y_i$
CO ₂	9,46	08,16	0,7719
H ₂ O	8,08	15,65	12,645
O ₂	7,11	4,01	0,2851
N ₂	6,99	72,18	50,454
$C_{p_{moy}}$ (kcal/kmole.°C)			73,755
Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{fumées}$)			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			161
Débit de gaz combustible (Nm ³ /h)			1309
Débit des fumées (kmoles/h)			965,06
$Q_{fumées}$ (kcal/h)			1 145 966

b) Sans préchauffeur d'air :

Dans ce qui suit on aura les tableaux des résultats de calcul de la quantité de chaleur perdue dans les fumées dans le cas où le préchauffeur d'air est inactif.

Tableau 25 : Quantité de chaleur perdue par les fumées F-101 (sans préchauffeur d'air)

Four 100-F-101			
Chaleur spécifique moyenne des fumées ($C_{p_{moy}}$)			
Constituants	C_{p_i} (kcal/kmole.°C)	y_i	$C_{p_i} \cdot y_i$
CO ₂	10,533	8,41	0,8858
H ₂ O	83,864	16,07	13,482
O ₂	74,218	3,50	0,2898
N ₂	71,128	72,02	51,226
$C_{p_{moy}}$ (kcal/kmole.°C)			76,164
Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{fumées}$)			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			483
Débit de gaz combustible (Nm ³ /h)			3282
Débit des fumées (kmoles/h)			2347,61
$Q_{fumées}$ (kcal/h)			7 831 588

Tableau 26 : Quantité de chaleur perdue par les fumées F-102 (sans préchauffeur d'air)

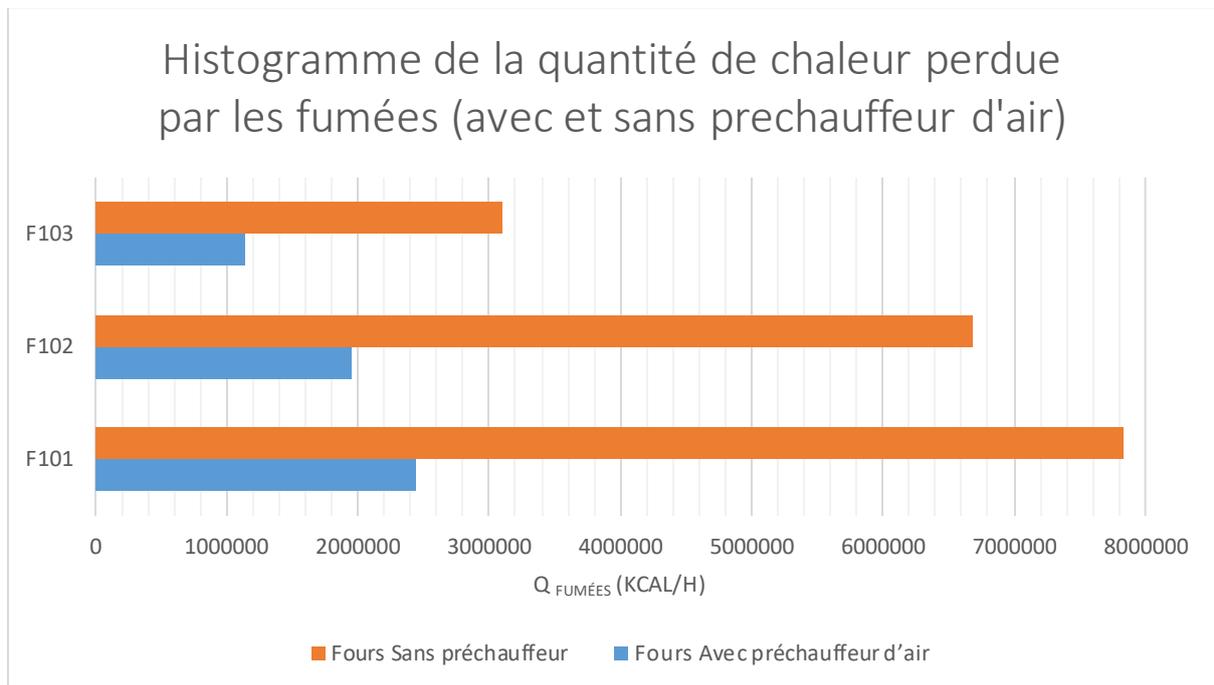
Four 100-F-102			
Chaleur spécifique moyenne des fumées ($C_{p_{moy}}$)			
Constituants	C_{p_i} (kcal/kmole.°C)	y_i	$C_{p_i} \cdot y_i$
CO ₂	10,827	8,41	0,9106
H ₂ O	83,686	16,07	13,448
O ₂	74,042	3,50	0,2591
N ₂	71,032	72,02	51,157
$C_{p_{moy}}$ (kcal/kmole.°C)			76,302
Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{fumées}$)			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			422
Débit de gaz combustible (Nm ³ /h)			2902
Débit des fumées (kmoles/h)			2075,80
$Q_{fumées}$ (kcal/h)			6 683 961

Tableau 27 : Quantité de chaleur perdue par les fumées F-103 (sans préchauffeur d'air)

Four 100-F-103			
Chaleur spécifique moyenne des fumées ($C_{p_{moy}}$)			
Constituants	C_{p_i} (kcal/kmole.°C)	y_i	$C_{p_i} \cdot y_i$
CO ₂	10,2640	8,17	0,8386
H ₂ O	82,920	15,66	12,985
O ₂	73,320	4,00	0,2933
N ₂	70,700	72,17	51,024
$C_{p_{moy}}$ (kcal/kmole.°C)			75,328
Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{fumées}$)			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			360
Débit de gaz combustible (Nm ³ /h)			1550
Débit des fumées (kmoles/h)			1142,07
$Q_{fumées}$ (kcal/h)			3 097 075

Tableau 28 : Tableau récapitulatif de la quantité de chaleur perdue par les fumées avec et sans préchauffeur d'air

Fours	Q _{fumées} (kcal/h)	
	Avec préchauffeur d'air	Sans préchauffeur
100-F-101	2 439 633	7 831 588
100-F-102	1 954 250	6 683 961
100-F-103	1 145 966	3 097 075



D'après l'histogramme on remarque des pertes considérables de chaleurs dans les fumées dans le cas du fonctionnement des fours sans préchauffeur d'air. Dans le cas du couplage avec le préchauffeur cette perte est presque trois fois moins que dans le cas du préchauffeur inactif.

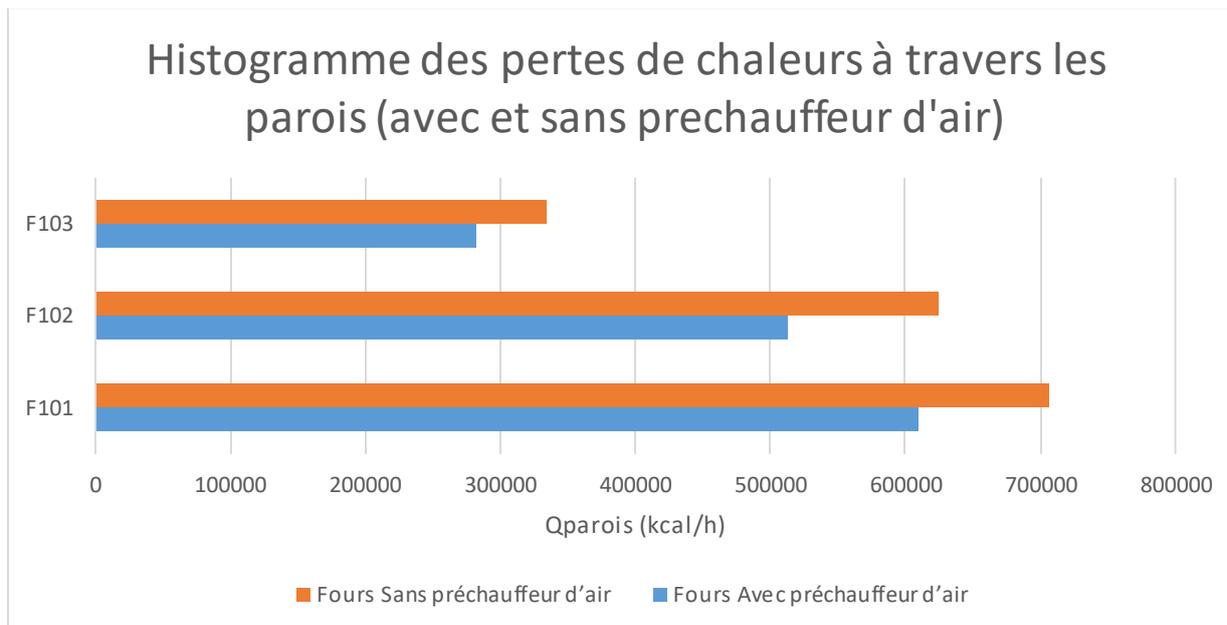
XXIX.7 Quantité De Chaleur Perdue Par Les Parois (Q_{parois}) :

Comme nous avons évoqué précédemment, les fours du complexe topping condensat 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.

$$Q_{parois} = Q_{fournie} \times 2\%$$

Tableau 29 : Tableau récapitulatif de la quantité de chaleur perdue par les parois avec et sans préchauffeur d'air

Fours	Q _{parois} (kcal/h)	
	Avec préchauffeur d'air	Sans préchauffeur d'air
F101	609 016	706 286
F102	513 467	624 510
F103	281 697	333 560



Maintenant nous avons toutes les données nécessaires pour calculer le rendement des trois fours.

XXIX.8 Calcul Du Rendement Thermique :

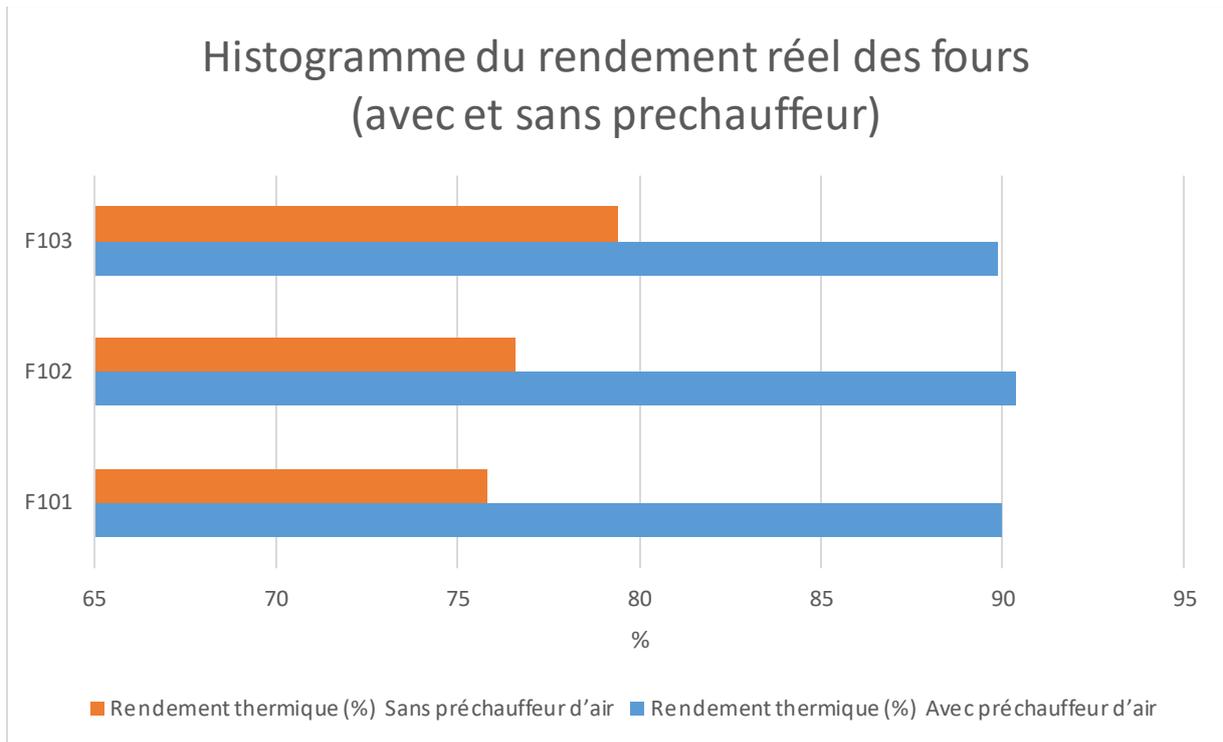
Pour calculer le rendement on utilisera la formule démontrée précédemment :

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

Les résultats de calculs sans regrouper dans le tableau suivant :

Tableau 30 : Le rendement thermique des fours (avec et sans préchauffeur d'air)

Fours	Rendement thermique (%)	
	Avec préchauffeur d'air	Sans préchauffeur d'air
F101	89,99	75,82
F102	90,39	76,59
F103	89,86	79,43



On remarquera une nette amélioration dans le rendement thermique des fours grâce au préchauffeur d'air. L'abaissement de la température des fumées est le moyen le plus efficace pour améliorer le rendement d'un four ; un abaissement de 20°C de la température des fumées correspond à un gain de rendement de l'ordre de 1 %.

Tableau 31 : Relation évolutive entre l'abaissement de température et le gain au niveau du rendement

Fours	Abaissement de T (°C)	Gain théorique (%)	Gain pratique (%)
F101	277	13,85	14,17
F102	261	13,05	13,80
F103	199	09,95	10,43

Les valeurs du rendement thermique de chaque four, calculées avec et sans préchauffeurs d'air, montrent que le gain réalisé par le fonctionnement des fours avec préchauffeur d'air est conforme à cette proportionnalité.

XXIX.9 Calcul De L'énergie Récupérée :

En considérant l'ensemble des trois fours, D'après les résultats du calcul, la différence entre la consommation du combustible (ΔM_v) avec et sans préchauffeur d'air est :

$$\Delta M_v = M_{vs} - M_{va}$$

Avec :

- M_{va} : débit du combustible consommé par les trois fours fonctionnant avec le préchauffeur d'air ;

- M_{vs} : débit du combustible consommé par les trois fours fonctionnant sans le préchauffeur d'air.

Nous avons :

- $M_{va} = 6525 \text{ Nm}^3/\text{h}$
- $M_{vs} = 7734 \text{ Nm}^3/\text{h}$

D'où :

$$\Delta M_v = 1209 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Alors:

$$\Delta M_v = 9\,575\,280 \text{ Nm}^3/\text{an}$$

<i>Gain du gaz combustible par an = 9 575 280 Nm³/an</i>

Pour connaître la quantité d'énergie récupérée on multiplie par le $PCI_{\text{combustible}}$:

$$Q_{\text{récupéré}} = \Delta M_v \times PCI_{\text{combustible}}$$

$$Q_{\text{récupéré}} = 1,03 \cdot 10^{11} \text{ kcal/an}$$

XXX. GAIN OBTENU :

Nous avons déterminé en haut la quantité de combustible économisée par an qui est de 9 575 280 Nm³/an.

En connaissant le prix actuel du gaz naturel = 4,64 DA/Nm³

On pourra alors déterminer le gain de combustible en Dinar qui est de :

$$9575280 \times 4.64 = 44429299.2 \text{ DA}$$

Le gain en dinars est alors de : 44 429 299.2 DA

Lors du fonctionnement du préchauffeur d'air on a deux ventilateurs aspirants CM-102 A/B.

100-CM-102A ou B consomme 250 KW selon le tarif 31 HTB de GRTE / SONELGAZ le Kilowatt absorbé est comptabilisé comme suit :

$$(\text{DA/KW/mois}) = 189.46 \text{ DA}$$

Puissance Absorbée 100-CM-102 250 Kw = 47365 DA /mois Hors taxe la taxe est de 17 % ce qui fait la mise en service de la 100-CM-102 A ou B coutera 55417,05 DA / mois (TTC).

Durant une année, elle coutera **665 004,6 DA.**

La mise en service de l'APH est conditionnée par le fonctionnement des 100-CM-102 A/B en même temps.

Pour les deux 100-CM-102 A/B on obtient : **1 330 009,2 DA**

Le gain réel est alors de :

$$44429299.2 - 1330009.2 = 43099290 \text{ DA}$$

<i>Gain Réel = 43 099 290 DA</i>

Conclusion Générale

XXXI. CONCLUSION GÉNÉRALE :

A partir de notre étude et des connaissances acquises lors de cette recherche approfondie, on déduit que les trois fours sont les poumons du complexe. Toutes défaillances de l'un d'eux entraînent l'arrêt du complexe. Ce sont aussi des équipements très sensibles, hautement dangereux, très énergivores et excessivement coûteux. Ils doivent travailler dans des conditions très strictes prescrites par le constructeur. De même qu'il faut une maintenance et un contrôle continu réalisés par des spécialistes afin de veiller au bon fonctionnement et à la durée de vie de ces fours.

La comparaison entre les deux cas de fonctionnement des fours a démontré que le préchauffeur d'air apporte les avantages suivants :

- ❖ Une augmentation des rendements thermiques des trois fours à environ de 13 % ;
- ❖ Un gain en consommation du gaz combustible de 1209 Nm³/h, soit environ 9,5 millions de Nm³/an, (soit une économie en consommation de combustible de 22 %) ;
- ❖ Un gain financier estimé à environ **43 millions DA/an** ;
- ❖ Une diminution de température des fumées de 394 à 164 °C (écart de 230°C) ;
- ❖ Une réduction des émissions de gaz à effet de serre vu que l'Algérie fait partie de la convention des Nations Unies sur les changements climatiques.

D'après les avantages précédemment cités, la quantité de combustible économiser lors du fonctionnement du préchauffeur d'air (**1209 Nm³/h**) permettra de faire fonctionner le four **F-103** avec un taux de marche de **92,36 %**. Cela pourrait être une option intéressante à prendre en considération pour l'économie du complexe **RA2/K**.

En vue des résultats obtenus à partir de notre étude on a pu mettre en évidence le rôle et le gain par an qu'on peut récupérer à partir du préchauffeur d'air et tout arrêt de celui-ci entraîne des pertes énergétiques et financières non négligeables. De même qu'au point de vue technique et environnemental, des fumées à des températures élevées ont des répercussions sur la durée de vie du four dans la zone de convection et un effet de serre certain.

XXXII. REFERENCES

1. Distillation. *Wikipedia*. [En ligne] 29 Mars 2021.
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Distillation>.
2. R. Turns, Stephen. *AN INTRODUCTION TO COMBUSTION Concepts and Applications*. New York : Mc Graw Hill, 2012.
3. La Combustion. *Wikipedia*. [En ligne] 21 Avril 2021.
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Combustion>.
4. K. Kuo, Kenneth. *Principles of Combustion*. New Jersey : Jhon Wiley & Sons, INC, 2005.
5. Waldheim, Lars et Nilsson, Torbjörn. *Heating Value of Gases From Biomass Gasification*. Nyköping : TPS Termiska Processer AB, 2001.
6. Mullinger, Peter et Jenkins, Barrie. *Industrial and Process*. 2nd. Oxford : Elsevier's Science&Technology, 2014.
7. ENSPM formation. *Matériél thermique*. s.l. : IFP Training, 2005.
8. Complexe RA2/K. *Manuele Operatoire U-100*. Skikda : s.n., 2007.
9. Wuithier, P. *Raffinage et Génie Chimique*. s.l. : éd Technip, 1972.

Annexes

ANNEXE 1

Contrôle Avant La Mise En Marche

Il a pour but de vérifier l'état des équipements et des annexes du four afin de s'assurer que l'ensemble est en état de marche. (8)

Respect des règles et des procédures :

Il est très important de conduire convenablement un four. Une conduite non appropriée peut en effet entraîner des arrêts inopportuns et une réduction de la durée de vie du four.

- Si l'arrêt du four est imprévu, la perte de production peut se traduire par une perte financière importante ;
- Si quelques règles élémentaires d'exploitation sont respectées, le four offrira un service satisfaisant pendant de longues durées ;
- Le respect des procédures fondamentales permettra d'obtenir la durée maximale d'utilisation.

Les consignes suivantes doivent être respectées de manière aussi rigoureuse que possible.

a) Brûleurs :

- Ils doivent fonctionner de façon que les flammes ne lèchent pas les tubes ;
- Ils sont réglés pour fournir une chauffe uniforme ;
- Il est souhaitable de faire fonctionner tous les brûleurs même lorsque le four marche à capacité réduite, de façon à assurer une distribution uniforme de la chaleur sur tous les tubes ;
- Le système de sécurité doit être en état de marche.

b) Excès d'air :

- L'excès d'air requis pour un fonctionnement convenable des brûleurs est 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. Cependant, une analyse des fumées devra indiquer qu'elles ne contiennent pas d'oxyde de carbone (CO) ;
- La présence de l'oxyde de carbone dans les gaz brûlés entraîne une postcombustion dangereuse qui se signale par une augmentation rapide de la température à la cheminée ;

- Des mesures immédiates doivent être prises pour arrêter cette augmentation. En effet, si ce phénomène se poursuit, il peut en résulter un dommage sérieux sur la charpente supérieure du four et sur la cheminée ;
- Ces mesures consistent à réduire le taux de chauffe, à ouvrir les registres des brûleurs et ensuite à réaugmenter le taux de chauffe jusqu'au niveau requis ;
- Si ces mesures n'annulent pas l'effet de postcombustion, le taux de chauffe doit être diminué de façon importante jusqu'à ce que la postcombustion s'arrête ; on pourra ensuite réaugmenter le taux de chauffe.

c) Fuite de gaz :

Si une fuite de gaz combustible se produit, tous les pilotes des brûleurs à gaz doivent être arrêtés et le four purgé pendant 10 minutes avec de la vapeur avant de rallumer les pilotes et les brûleurs.

Mise En Marche Et Arrêt D'un Four

La mise en marche et l'arrêt d'un four sont les phases les plus délicates de son fonctionnement. Un soin particulier doit être apporté à l'exécution de ces opérations. (8)

Mise en marche :

Avant d'allumer les brûleurs :

Il faut établir la circulation de la charge dans chacune des passes du four. Chaque faisceau sera vérifié de manière à s'assurer que la charge est également répartie dans chaque passe. La procédure suivante est recommandée.

- Ouvrir la vanne d'entrée d'une première passe en maintenant fermées celles des autres. Généralement les sorties ne sont pas équipées de vannes, mais dans les cas très spéciaux où elles le seraient, la vanne de sortie correspondant à la première passe sera aussi ouverte ;
- Mettre en route la pompe à sa pleine capacité sur la première passe jusqu'à ce qu'un débit effectif s'établisse dans celle-ci ;
- Fermer les vannes de la première passe et répéter la même procédure avec chacune des autres passes ;
- Une fois l'air évacué de tous les faisceaux et un débit effectif établi dans chaque passe, la circulation normale de l'ensemble peut être obtenue.

Fonctionnement en contrôle manuel :

Le four doit fonctionner en contrôle manuel pendant la mise en marche. Ce n'est que lorsque toute l'unité aura atteint son niveau opératoire normal que l'on passera en contrôle automatique. Les températures de sortie de chaque passe sont vérifiées soigneusement pendant la mise en route. Tous les thermocouples de sortie doivent indiquer une augmentation régulière de température. Si aucune augmentation de température n'est enregistrée sur une ou plusieurs passes, le passage au niveau opératoire normal doit être différé jusqu'à ce que la raison de cette anomalie soit déterminée.

Evolution du taux de chauffe :

Le taux de chauffe doit être augmenté progressivement et l'on ne doit pas chercher à atteindre la température opératoire trop rapidement. En augmentant lentement la température de sortie, on a la possibilité d'effectuer des ajustements de débits et/ou tous autres ajustements qui ne sont pas possibles dans les conditions opératoires normales.

Mise à l'arrêt du four :**Arrêt normal :**

Il est nécessaire de passer en contrôle manuel pour procéder à l'arrêt du four. Le taux de chauffe de chaque brûleur est normalement diminué sous contrôle manuel de manière à abaisser la température de sortie d'environ 30 °C en dessous de la température opératoire normale. A ce niveau, les brûleurs peuvent être arrêtés mais la circulation de la charge doit être maintenue jusqu'à ce que la température de sortie devienne inférieure de 80 °C environ à la température opératoire normale. A ce moment, selon les exigences du procédé, de la vapeur peut être injectée à l'entrée du four et la charge évacuée par un drainage, ou bien la circulation peut être maintenue à travers le four jusqu'à ce que les températures de sortie soient de l'ordre de 100 °C à 150 °C.

Arrêt d'urgence nécessité par un autre équipement que le four :

Dans le cas d'arrêt d'urgence, nécessité par d'autres équipements que le four, il faut arrêter à la fois les brûleurs et la circulation de la charge et injecter de la vapeur jusqu'à ce qu'aucune trace d'huile ne soit relevée dans les effluents.

Arrêt d'urgence nécessité par le four :

En cas d'arrêt d'urgence nécessité par le four, provenant d'une cause telle qu'une rupture de tubes, tous les brûleurs doivent être immédiatement arrêtés ainsi que la circulation de la charge. De la vapeur d'étouffement sera immédiatement introduite dans les serpentins et les caissons en quantité suffisante pour refroidir le four et éteindre le feu résultant de la charge qui a pu se répandre. Il ne faut pas essayer de régler le registre en cas de rupture de tubes. La fermeture du registre peut entraîner le jaillissement des flammes à travers les regards et les registres des brûleurs, ce qui peut entraîner des accidents de personnel et/ou des détériorations de l'équipement.

Allumage d'un four :

L'allumage d'un four ne présente ni difficulté, ni danger, à condition que l'on respecte scrupuleusement la procédure d'allumage (check list). La période d'allumage est cependant une période critique pendant laquelle l'attention ne doit jamais se relâcher. Pour que l'allumage soit réussi, il faut que la combustion puisse se faire immédiatement. Elle ne peut se faire que si l'alimentation en air de combustion est convenable, la pulvérisation du combustible liquide est parfaite et la source d'inflammation est correcte. Il est essentiel que l'opérateur connaisse parfaitement les circuits de son four et toutes les sécurités, propres au combustible (en cas de manque de pression par exemple), propres au fluide à chauffer (en cas de débit bas ou de manque de débit), propres au four lui – même ou au procédé (en cas de pression trop haute dans la chambre de combustion par exemple).

La procédure d'allumage comporte un certain nombre de contrôles et d'opérations préalables qui doivent être exécutés dans l'ordre exigé par la check list. Cette procédure s'insère dans un ensemble. On n'allume pas le four n'importe quand ; les préparatifs d'allumage se situent à un certain moment par rapport au démarrage de l'unité. (8)

Contrôle avant l'allumage du brûleur :

Il a pour but de vérifier l'état de toutes les parties du four et de ses annexes, afin de s'assurer que l'ensemble est bien en état de marche. Ce contrôle comprend la vérification des éléments suivants :

- Vérifier qu'il n'y a pas de matériel encombrant et inflammable dans les zones praticables et adjacentes du four.
- Vérifier que toutes les ouvertures d'accès et de regards sont fermées. L'air ne doit entrer dans le four que par les registres des brûleurs.
- S'assurer que les vannes et robinets de combustibles des brûleurs sont fermés étanches. Une vanne ouverte ou fuyarde peut amener la formation d'un mélange explosif dans le foyer,
- Régler le zéro des déprimomètres et les brancher sur le four,
- Vérifier que les registres d'air et de fumées sont grands ouverts. L'air sera nécessaire d'abord pour balayer le four, ensuite pour la combustion,
- Contrôler le ballon séparateur de gaz en ouvrant la purge. Tout le liquide contenu doit être purgé dans le réseau de purge,
- Purger le four. Dans les fours à tirage naturel, un balayage à la vapeur est nécessaire pour réchauffer l'air du foyer et amorcer le tirage en utilisant les lances de la vapeur placées dans les ouvertures des brûleurs et en laissant le passage de la vapeur

suffisamment longtemps (minimum 30 mn) pour obtenir un tirage convenable et enlever du foyer tout mélange combustible

- Vérifier que le taux d'explosivité soit négatif, ensuite allumer les pilotes à gaz, les pilotes doivent être allumés un par un après avoir vérifié qu'ils fonctionnent parfaitement,
- Régler l'excès d'air de manière à ce que la flamme des pilotes ne soit pas détachée du pilote,
- L'allumeur, que ce soit une canne électrique, une torche à gaz ou à gasoil doit être prêt à fonctionner,
- Commencer à allumer les brûleurs un par un selon les besoins afin que le feu dans le four soit équilibré avant d'allumer chacun des brûleurs vérifier que le pilote correspondant soit allumé.
- Assurer le passage de la vapeur à travers les serpentins quand la chambre de convection atteint 150°C.

Allumage des brûleurs a gaz :

La procédure d'allumage d'un brûleur à gaz est la suivante :

- Préparer le four comme indiqué précédemment,
- Vérifier avant de couper la vapeur que le four est assez chaud pour créer un tirage,
- Ouvrir la vanne principale d'isolement sur le réseau combustible pour mettre tout le circuit en pression jusqu'au vannes de contrôle,
- Contrôler à nouveau le ballon séparateur afin de purger tout le liquide s'il est présent,
- Contrôler encore le tirage à la cheminée,
- Préparer une torche dans le cas où l'installation n'est pas équipée d'un dispositif d'allumage automatique,
- Allumer les pilotes (tous les pilotes doivent être allumés avant de commencer l'allumage des brûleurs),
- Allumer chaque brûleur en ouvrant lentement sa vanne d'alimentation (commencer toujours par allumer le brûleur central puis les brûleurs latéraux, un à un de façon à maintenir un équilibre et une répartition correcte de la chauffe. Dans les fours cylindriques, allumer un brûleur et ensuite son opposé),

- Ouvrir légèrement les vannes de contrôle de gaz (en contrôle manuel) juste avant l'allumage du 1er brûleur,
- Surveiller la pression du gaz en aval de la vanne de contrôle. Au fur et à mesure que d'autres brûleurs sont allumés, ouvrir la vanne de contrôle de façon à maintenir la pression et conserver des flammes stables,
- Lorsque le brûleur est allumé, ouvrir les registres d'air jusqu'à ce que la couleur de la flamme passe du jaune au bleu. Ne pas éteindre la flamme en ouvrant trop les registres (un tirage trop fort risque de souffler la flamme).

Remarque : tous les brûleurs doivent être allumés de la même façon. On n'allume jamais un brûleur au moyen d'un autre car cette opération peut entraîner une explosion.

Ce qu'il ne faut pas faire.

- Si au bout de 20 secondes, le premier brûleur ne s'est pas allumé, l'opérateur ne doit pas continuer à actionner l'allumeur. Il ferme la vanne et recherche les causes de l'insuccès ;
- Avant toute tentative de rallumage, le four est maintenu en balayage naturel ou pulsé pendant la durée prévue dans les consignes propres au four. C'est un point capital de sécurité ;
- Après une extinction accidentelle, on ne rallumera jamais au flash, c'est-à-dire en profitant de la chaleur existante des réfractaires.

L'allumage d'un four ne présente pas de difficulté si l'on respecte la procédure. C'est l'allumage raté qui peut être dangereux, car des gaz combustibles peuvent s'accumuler dans le foyer.

REGULATION DANS UN FOUR

Elle porte sur les paramètres suivants : l'allure de la chauffe, le débit du fluide de procédé, le débit du gaz combustible et la proportionnalité gaz combustible/air. (6)

Allure De La Chauffe

Elle est la plus importante des fonctions prévues pour le fonctionnement correct d'un four. L'allure de la chauffe est asservie à la température du fluide de procédé.

Débit Du Fluide De Procédé

La régulation du débit du fluide de procédé dans les passes d'un four a pour but d'assurer une répartition égale à 5% près au maximum dans chacune des passes. Certains exploitants assurent cette répartition à l'aide d'une vanne à réglage manuel mais, dans la plupart des cas, ce réglage est assuré par un FIC (Flow Indicator Controller) monté sur chacune des passes.

La répartition égale de la charge dans les passes est une opération relativement délicate, sensible à la fluctuation de la charge et aux incidents survenant en exploitation tel que l'encrassement d'un tube. Cette fonction de régulation ne doit pas supprimer l'obligation de vérifier sur chacune des passes la pression en amont des faisceaux et la température de fluide à la sortie du faisceau.

Débit Du Combustible

La régulation du débit du gaz combustible permet d'avoir le débit calorifique nécessaire pour avoir la température exigée du fluide de procédé à la sortie du four.

Rapport Air/Gaz Combustible

La régulation de la proportionnalité air/gaz combustible peut être assurée en fonction de l'indication donnée par :

- Un analyseur de O₂ ;
- Un analyseur de CO₂ ;
- Un instrument mesurant le débit ou la pression de combustible ;
- Un instrument mesurant le débit ou la pression de l'air.

Les paramètres de contrôle d'un four sont :

- La température du fluide de procédé ;
- La température de rejet des fumées ;
- La température de la charpente métallique ;
- La température de peau des tubes ;
- La pression de l'air soufflé ;
- La pression du gaz combustible ;
- La pression de la vapeur d'étouffement ;
- La dépression de la chambre de convection-carneau ;
- Les pertes de charge (encrassements interne et externe) ;
- L'oxygène dans les fumées ;
- L'opacité des fumées.

SECURITE DES FOURS INDUSTRIELS

Facteurs De Risque Liés A L'utilisation Des Fours :

En fonctionnement normal, l'alimentation en combustible et en air, ainsi que la conception du brûleur, assurent une alimentation constante du combustible entrant et une réaction chimique continue (combustion) clairement illustrée par le triangle du feu (Chapitre II, figure 9).

Si l'un des trois composants du triangle du feu manque, la réaction ne peut pas être soutenue. Si le combustible est le composant manquant, le système est sûr. Cependant, s'il manque de l'air, ou de la chaleur pour l'allumage, la situation est potentiellement dangereuse, mais pour qu'une explosion se produise, le mélange air/carburant doit se situer dans la plage d'inflammabilité.

La stratégie de base la plus couramment adoptée pour minimiser le risque d'explosion dans les fours et autres installations utilisant des combustibles, à l'exception des systèmes de combustion du charbon, consiste tout d'abord à s'assurer que les mélanges inflammables ne s'accumulent nulle part dans l'installation et à veiller à ce que, lorsqu'il existe un risque de présence d'un mélange inflammable, toutes les sources d'inflammation soient éliminées.

Il existe un certain nombre de sources potentielles de mélanges inflammables dans un four ou une installation de traitement. Il s'agit notamment de :

- Fuite de fioul ou de gaz dans la chambre de combustion à travers le brûleur en raison d'une fuite des vannes d'arrêt du combustible ;
- Des dépôts de charbon ou d'huile provenant de périodes d'allumage précédentes, qui n'ont pas été correctement purgés du système ;
- Fonctionnement de l'installation avec un air de combustion insuffisant (fonctionnement sous-stœchiométrique), entraînant la présence de CO et de combustible imbrûlé dans les conduits en aval et dans le dépoussiéreur ;
- Extinction de la flamme par la poussière froide qui entre dans le four. La poussière froide peut réduire la température dans certaines parties de la flamme en dessous de la température d'allumage. Les flammes de gaz sont particulièrement vulnérables à ce problème, en raison de la température d'allumage élevée du gaz naturel ;
- Combustible entrant dans le four à la suite de tentatives d'allumage répétées et sans succès. Il s'agit d'un risque important dans le cas de la combustion du fioul, en particulier particulièrement lorsque l'huile n'est pas suffisamment chaude pour s'enflammer facilement. Une cause typique est l'huile froide restant dans les tuyaux pendant l'arrêt. Cette huile est admise dans le four à chaque tentative d'allumage mais ne s'enflamme pas et colle aux parois. Lorsque le fioul chaud arrive enfin au brûleur, l'allumage est réalisé et le fioul froid sur les parois du four se vaporise et s'enflamme sous l'effet de la chaleur rayonnante de la flamme. Brûle très rapidement et une augmentation de pression dommageable se produit.

Des explosions destructrices ont résulté de toutes ces causes de mélanges inflammables, les sources d'inflammation ultérieures étant généralement l'allumeur, la flamme principale ou une étincelle dans le dépoussiéreur. Les étincelles sont présentes dans les dépoussiéreurs à électrofiltre (ESP) en fonctionnement normal, mais peuvent également être générées dans les filtres à manches par l'accumulation de charges électrostatiques sur les sacs, à moins que des sacs antistatiques ne soient utilisés.

Contrôle Du Procédé :

Les systèmes pneumatiques sont obsolètes, et tous les nouveaux fours et les modernisations utilisent des automates programmables pour le contrôle individuel des fours, ou les fours sont contrôlés par le système de contrôle distribué (Distributed Control System) « DCS » de l'usine. Quel que soit le matériel utilisé, le système de contrôle du procédé doit répondre à un ou plusieurs des objectifs suivants :

- Maximiser la capacité de production des fours ;
- Assurer une qualité de produit satisfaisante ;
- Minimiser la consommation de combustible ;
- Minimiser les émissions ;
- Contrôler le réchauffement du four ;
- Permettre un passage en douceur d'un produit à l'autre.

Les systèmes de contrôle des fours tentent généralement d'atteindre ces objectifs en contrôlant un ou plusieurs des paramètres suivants :

- Le(s) débit(s) de combustible ou les apports de chaleur au four ;
- Le débit d'air de combustion ou le(s) rapport(s) air/combustible ;
- Température de l'air de combustion ;
- Température(s) du four ;
- Composition des gaz de sortie du four ;
- Température des gaz de sortie du four ;
- Vitesse d'alimentation des matières premières dans le four ;
- Composition physique et chimique des matières premières du four ;
- Température de sortie du produit.

Il est à noter que la mesure directe de la qualité des produits est extrêmement rare en raison de la grande difficulté ou de l'impossibilité d'effectuer de telles mesures pour de nombreux procédés et bien que la qualité du produit soit souvent liée à la température, cette relation est souvent non linéaire. Cela signifie que le contrôle des fours est généralement basé sur une interprétation de la qualité du produit à partir d'une série de mesures secondaires,

qui lorsqu'elles se produisent dans la combinaison appropriée, fournissent des conditions favorables à une qualité optimale du produit.

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. Lorsqu'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.

Les fours modernes sont normalement équipés de systèmes de verrouillage de sécurité, appelés systèmes de gestion du brûleur (BMS).

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.

- A. **Priorité première** : donner la priorité à la sécurité même s'il s'agit d'arrêter la production.
- B. **Conformité** : respecter les procédures et les règles existant dans les documents officiels de l'unité.
- C. **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.
- D. **Evaluation 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.
- E. **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.

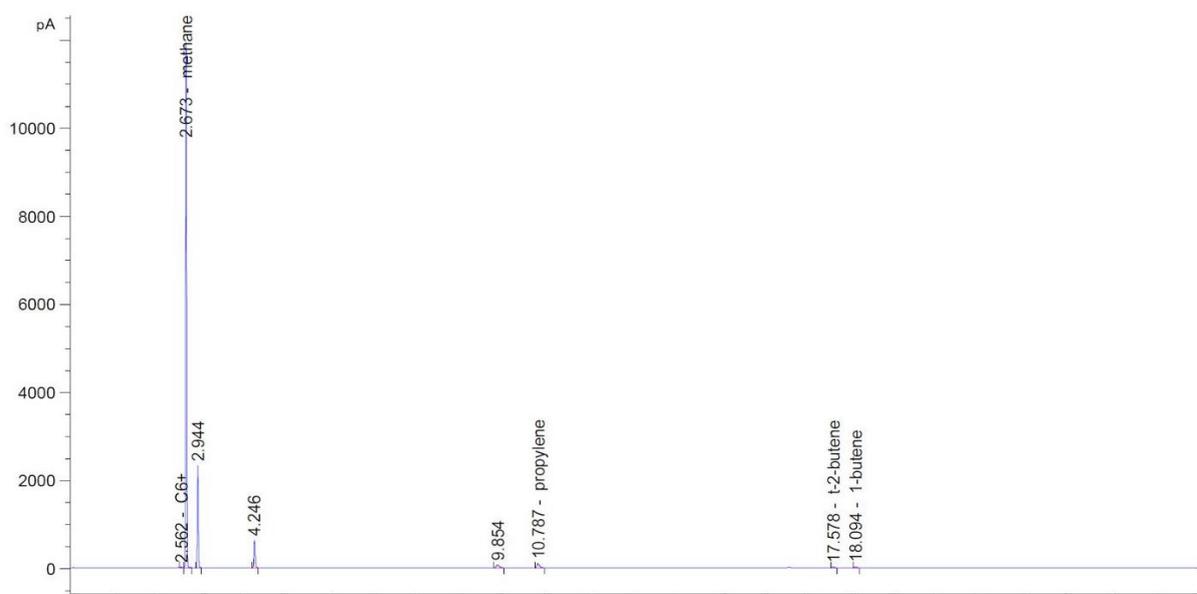
Le respect de ces 05 barrières est très important pour atteindre le 0 accident. L'accident est une erreur matérielle, derrière laquelle se cache toujours une erreur humaine, car ce matériel nécessite un entretien, une maintenance. L'origine et la cause sont humaines.

ANNEXE 2

Composé chimique	Masse molaire (g/mol)	$\Delta H_{f(298)}^0$ (kJ/mol)	S°_{298} (J/(mol·K))
CO ₂ (g)	44,010	-393,52	213,75
CO (g)	28,011	-110,58	197,6
NO (g)	30,008	90,32	210,7
NH ₃ (g)	17,031	-45,91	192,66
CH ₄ (g)	16,043	-74,9	186,17
C ₂ H ₆ (g)	30,068	-84,7	229,57
C ₃ H ₈ (g)	44,094	-103,88	270,01
C ₄ H ₁₀ (g)	58,12	-124,78	310,15
C ₅ H ₁₂ (g)	72,146	-146,50	349,49
C ₆ H ₁₄ (g)	86,172	-167,25	386,95
C ₇ H ₁₆ (g)	100,21	-187,89	425,41
C ₈ H ₁₈ (g)	114,224	-208,52	463,84
C ₂ H ₄ (g)	28,054	52,49	219,30
C ₃ H ₆ (g)	42,078	20,42	267,03
C ₂ H ₂ (g)	26,038	226,81	200,92
C ₆ H ₆ (g)	78,108	82,96	269,30
H ₂ (g)	2,016	0	130,46
H (g)	1,008	218,06	114,65
N ₂ (g)	28,016	0	191,32
N (g)	14,008	472,96	153,23
O (g)	16,000	249,28	161,02
O ₂ (g)	32,000	0	204,82
O ₃ (g)	48,000	142,12	237,42
C (graphite)	12,011	0	5,68
C (diamant)	12,011	1,92	2,45
H ₂ O (liquide)	18,01528	-285,10	69,96
H ₂ O (gaz)	18,01528	-241,8	188,74
HF (liquide)	20,00634	-299,8	
HF (gaz)	20,00634	-271,1	173,7
HCl (gaz)	36,461	-92,31	186,90

$\Delta H^{\circ}_{formation}$ Des éléments chimiques commun (Wikipédia)

ANNEXE 3



Pics d'analyse du chromatographe en phase gazeuse

ANNEXE 4

Fiche technique du préchauffeur d'air (APH)

PURCHASER / OWNER:		CPECC		ITEM NO.: BC9959		
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, m2	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				
7	PERFORMANCE DATA					
8	OPERATING CASE	MAX CASE (1)	MIN CASE	115% MAX CASE		
9						
10	AIR SIDE: flow entering, kg/h	125136	57852	143856		
11	inlet temperature, C.	25	25	25		
12	outlet temperature, C.	290	246	287		
13	pressure drop: allowable, mm H2O	204 (4)	204 (4)	204 (4)		2
14	calculated, mm H2O	152	34	204		2
15	heat absorbed, MW	9,47	3,641	10,778		
16	FLUE GAS SIDE: flow, kg/h	132048	61056	151884		
17	inlet temperature, C.	371	307	370		
18	outlet temperature, C.	143	115	145		2
19	pressure drop: allowable, mm H2O	152,0	152	200		
20	calculated, mm H2O	152	37	198		
21	heat exchanged, MW		3,67			
22	AIR BY-PASS, kg/h	0	0	0		
23	TOTAL AIR FLOW TO BURNERS, kg/h	125136	57852	143856		
24	MIX AIR TEMPERATURE, C.	290	246	287		
25	FLUE GAS COMPOSITION, mole% (O2/N2/H2O/CO2/SOx)	(3)	(3)	(3)		
26	FLUE GAS SPECIFIC HEAT, kJ/kg-C	1,1449	1,1323	1,145		
27	FLUE GAS ACID DEW POINT TEMPERATURE, C.	57				
28	MINIMUM METAL TEMPERATURE: allowable, C.					
29	calculated, C.	113	91	114		
30	MISCELLANEOUS:					
31	MINIMUM AMBIENT AIR TEMPERATURE, C.	1				1
32	SITE ELEVATION ABOVE SEA LEVEL, m	8				1
33	RELATIVE HUMIDITY max/norm/min	79% / 72% / 69%				1
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	MECHANICAL DESIGN:					
42	DESIGN FLUE GAS TEMPERATURE, C.	450				
43	DESIGN PRESSURE DIFFERENTIAL, mm H2O	-500 +500				
44	SEISMIC FACTOR	UBC 1997 - Sismic zone=3, I=1,25; Site amplif. Factor=2				2
45	PAINTING REQUIREMENTS	By Cast standards				
46	LEAK TEST					
47	STRUCTURAL WIND LOAD, kg/m2	Eurocode-110km/h; S3, C=1; CTmp=1; Call=1; Gpeak=3,5				2
48	AIR LEAKAGE (GUARANTEED), %					
49	NOTES: (ALL DATA ON PER UNIT BASIS):					
50	(1): Design of airpreheater is with heaters running at "MAX CASE"					
51						
52	(3): Flue gas composition from combustion of a mixture of natural gas and propane resulting from process (with excess air =15%)					
53	Natural gas composition (% mol): N2=5,6; CO2=0,12; CH4=82,27; C2H6=6,95; C3H8=2,15; IC4=0,33; NC4=0,53; IC5=0,09; NC5=0,11; C6H14=0,13					
54	The flow rate and components of propane refer to the propane data (see sheet 18 of SC1-100-DS-FU-0001)					
55	(4): Kirchner wants to design airpreater in both conditions (maximum and 115% max case) also for pressure drop.					1
56	(5): Minimum inlet air temperature = 10°C according BEDD					1
57	(6): Guaranteed leakage air to flue gas side less than 0,4%					1
AIR PREHEATER DATA SHEET				B-4783-85-DS-2		
API STD-560				REV: C	Date: 02/08/2007	Sheet 2 of 4

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	
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+68	
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 (yse/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			