République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie des Procédés

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

2ème Année Master

Evaluation du rendement des fours de l'unité Topping de RA2K

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

Présenté par :

Azaizia Mariem

Bahri Aya

Sous la direction de :

Y. BOULMOKH

2024 - 2025

Résumé

Dans le cadre de notre étude, nous avons entrepris une comparaison des caractéristiques thermiques des fours de l'unité Topping de la raffinerie de Skikda, en utilisant deux modes de fonctionnement : avec et sans préchauffeur d'air (APH). Cette démarche vise à évaluer l'impact de la présence de l'APH sur les performances thermiques globales des installations. Nous avons obtenu une notable amélioration du rendement thermique des fours modernes, atteignant un pourcentage de 90%.

Mots clés : Raffinerie, four, préchauffeur d'air, rendement thermique, combustion.

ملخص

في إطار دراستنا، أجرينا مقارنة للخصائص الحرارية للأفران في وحدة التكريرتوبينغ بسكيكدة باستعمال وضعي تشغيل: مع مُسخّن هواء مسبق وبدونه. يهدف هذا النهج إلى تقييم تأثير وجود مُسخّن هواء مسبق على الأداء الحراري العام للمنشآت. وقد حققنا تحسنًا ملحوظًا في الكفاءة الحرارية للأفران الحديثة حيث وصلت إلى 90%.

الكلمات المفتاحية: المصفاة، الفرن، سخان الهواء المسبق، الكفاءة الحرارية، الاحتراق.

Abstract

As part of our study, we undertook a comparison of the thermal characteristics of the furnaces of the Topping unit of the Skikda refinery, using two operating modes: with and without air preheater (APH). This approach aims to evaluate the impact of the presence of the APH on the overall thermal performance of the installations. We obtained a significant improvement in the thermal efficiency of modern furnaces, reaching a percentage of 90%.

Keywords : Refinery, furnace, air preheater, thermal efficiency, combustion.

بِسۡمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحۡمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

Remerciements

Il est difficile de trouver les mots justes pour exprimer toute la gratitude que nous ressenons aujourd'hui. Ce travail est l'aboutissement d'un parcours jalonné de doutes, d'efforts, mais surtout de belles rencontres et de soutiens inestimables.

Ce projet n'aurait pas abouti sans la bénédiction du Bon Dieu, Qui nous a donné le courage et la volonté pour réaliser ce travail et Qui a entendu nos prières.

Au terme de ce travail de fin d'études, nous tenons à exprimer notre gratitude à toutes les personnes qui ont rendu ce travail possible.

*À notre encadrante, **Mme BOULMOKH YAMINA**, pour sa guidance avisée, sa disponibilité et ses précieuses remarques qui ont orienté nos réflexions.*

Au personnel de Sonatrach, pour leur aide et leur suivi durant notre période de stage.

À nos familles et proches, pour leur soutien sans faille, leur patience durant les longues heures de travail et leurs encouragements précieux.

À nos camarades de promotion, pour les échanges stimulants et l'atmosphère d'entraide qui ont enrichi ce parcours.

Enfin, un merci particulier à notre binôme – cette collaboration a été une source d'apprentissage mutuel, de complémentarité et de motivation constante.

Dédicaces

Avec tous mes sentiments de respect et de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie

À ma mère,

Battement de mon cœur et secret de ma patience. C'est entre tes mains que ma force est née, et c'est de toi que j'ai appris la persévérance. Chaque réussite que je vis est le prolongement de tes innombrables sacrifices.

À mon père,

Mon ombre protectrice. Tu as été et tu resteras toujours ma première présence lorsque je cherche la sérénité. Que mes prières, ma gratitude et mon amour t'accompagnent toujours.

***À mes frères et sœurs**, et à ceux qui portent des cœurs semblables aux vôtres, enfants et petits-enfants,*

Vous êtes la famille dont je suis fière. Vous êtes la chaleur dans le froid des jours. Dans vos prières et vos sourires, j'ai trouvé ce qu'il me fallait pour continuer.

***À ma partenaire de recherche et de parcours**,*

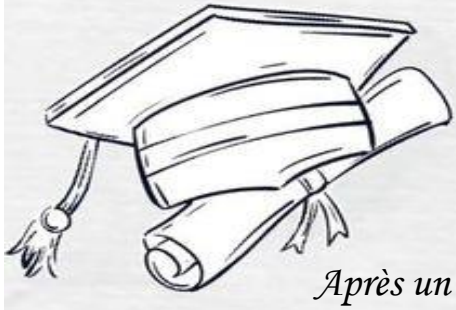
***À l'âme sœur** de mon esprit et de mon cœur **« Mariem »**, celle qui a partagé les épreuves avant les joies…Merci d'avoir toujours été là, m'offrant de ta patience et de ta foi, juste ce qu'il fallait pour que nous puissions avancer ensemble.*

***À** tous ceux qui m'ont offert une parole douce, un regard de soutien, ou un instant de sincérité…*

***À** ceux dont les noms ne sont peut-être pas écrits ici, mais dont les cœurs sont gravés sur mon chemin : merci à vous.*

Et à chaque enseignant qui a mis une lumière sur ma route, ou m'a poussée d'un pas vers l'avant…

BAHRI AYA



Dédicaces

Après un parcours riche en défis, me voici arrivée à ma destination.

Je dédie ce travail modeste à ceux qui ont été pour moi la lumière lorsque les chemins s'assombrissaient, et le soutien lorsque mes pas devenaient lourds.

À ma chère mère,

Aucun remerciement au monde ne saurait exprimer ce que tu mérites. Ce travail est le fruit de ton sacrifice, et ce moment t'appartient avant tout.

À l'âme de mon père

L'absent toujours présent dans mon cœur. Combien j'ai souhaité que tu sois à mes côtés aujourd'hui pour voir ce rêve, dont tu as été le premier à semer la graine, se réaliser. Que cette réussite soit inscrite dans le registre de tes bonnes œuvres. Qu'Allah te fasse miséricorde et t'accorde le plus haut degré du Paradis.

À mes frères et à ma sœur,

Votre présence m'ont réchauffé le cœur dans les moments les plus difficiles. Votre présence dans ma vie est une bénédiction que je remercie Dieu chaque jour.

À ma partenaire dans ce parcours,

*compagne de mon cœur et de mon esprit **« Aya »**, qui a partagé avec moi fatigue et joie : merci d'avoir toujours été là, avec ton amour, ta confiance et ta belle patience.*

***À** ceux qui ont été le souffle lorsque le mien s'essoufflait, ceux qui m'ont relevée quand j'étais sur le point de tomber. Même si leurs noms ne sont pas cités, leurs places sont gravées dans mon cœur, portées par des prières silencieuses.*

***À mes amis fidèles: Sihem, Aya** et **Ichrak** ,*

compagnons de route choisis par mon âme… Merci pour votre soutien, et pour avoir été mon refuge.

Et enfin, à chaque enseignant qui a laissé son empreinte dans mon parcours : qu'Allah vous récompense pour tout le bien que vous m'avez transmis……

MARIEM AZAIZIA

Sommaire

Résumé

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures……I

Liste des tableaux……II

Liste des abréviations……III

INTRODUCTION GENERALE……...1

CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES FOURS

I.1. INTRODUCTION ……4
I.2. DEFINITION ET ROLE DES FOURS……4
I.3. TYPES DES FOURS ……5
I.3.1. Fours cabines à tubes verticaux ……5
I.3.2. Fours cabines à tubes horizontaux……5
I.3.3. Fours cylindriques verticaux ……5
I.4. DOMAINES D'APPLICATIONS INDUSTRIELLES ……6
I.4.1. Réchauffage d'un fluide sans changement de phase ……6
I.4.2. Réchauffage d'un fluide avec vaporisation partielle……6
I.4.3. Réchauffage d'un fluide avec réaction chimique ……7
I.5. ELEMENTS CONSTITUTIFS D'UN FOUR ……7
I.5.1. Zone de radiation……7
I.5.2. Zone de convection ……7
I.5.3. Faisceau tubulaire ……7
I.5.4. Charpente métallique ……7
I.5.5. Garnissage réfractaire……7
I.5.6. Cheminée ……8
I.5.7. Ramoneurs ……8
I.5.8. Les brûleurs ……8
I.6. LES PRECHAUFFEURS D'AIR ……9
I.6.1. Définition ……9
I.6.2. Types de préchauffeurs ……10
I.6.3. Principe de fonctionnement……11

CHAPITRE II: LA REACTION DE COMBUSTION

II.1. INTRODUCTION……13
II.2. DEFINITION……13
II.3. CONDITIONS DE COMBUSTION……13

II.4. TYPES DE COMBUSTION **14**
II.5. REACTIFS ET PRODUITS DE COMBUSTION **14**
II.6. LES COMBUSTIBLES **15**
II.6.1. Définition *15*
II.6.2. Types de combustibles *15*
II.6.3. Propriétés des combustibles *16*
II.7. REACTION DE COMBUSTION **16**
II.8. FACTEURS INFLUANT SUR L'EFFICACITE DE LA COMBUSTION **17**
II.9. POUVOIR CALORIFIQUE INFERIEUR PCI **18**
II.10. POUVOIR CALORIFIQUE SUPERIEUR PCS **18**
II.11. POUVOIR COMBURIVORE **18**
II.12. POUVOIR FUMIGENE **18**
II.13. EXCES D'AIR **18**
II.14. HUMIDITE RELATIVE **18**

CHAPITRE III: SUIVI DES PROCEDES ET METHODES DE CALCUL

III.1. INTRODUCTION **21**
III.2. LA RAFFINERIE DE CONDENSAT RA2K **21**
III.2.1. Description de la raffinerie *21*
III.2.2. Les équipements de la raffinerie *21*
III.3. CONCEPTION GENERALE DE LA RAFFINERIE **22**
III.3.1. Unité Topping de Condensât (U100) *22*
III.3.2. Unité de traitement du kérosène (U200) *22*
III.3.3. Unité de stockage et de transfert (U300) *22*
III.3.4. Système de torche (U400) *22*
III.3.5. Les utilités (U500) *23*
III.4. PROCEDE DE DISTILLATION **23**
III.4.1. Préchauffage du produit brut ou de charge (condensat) *23*
III.4.2. Préfractionnement *24*
III.4.3. Distillation atmosphérique *24*
III.4.4. Distillation sous vide *25*
III.4.5. Stabilisation des essences *26*
III.4.6. Dépropaniseur *27*
III.4.7. Unité de séchage de Butane *28*
III.5. METHODES DE CALCUL DU RENDEMENT THERMIQUE DES FOURS **29**
III.5.1. Définition du rendement *29*
III.5.2. Paramètres influant sur le rendement d'un four *30*
III.5.3. Méthodes de calcul *30*
III.6. ETUDE TECHNICOECONOMIQUE : **36**
III.6.1. L'énergie récupérée *36*
III.6.2. Calcul du gain d'argent *36*

CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. INTRODUCTION **38**
IV.2. RENDEMENTS DES FOURS **38**
IV.2.1. Données d'étude *38*
IV.2.2. Composition du gaz combustible *40*

IV.2.3. Pouvoir calorifique inferieur (PCI) des constituants du gaz combustible *40*
IV.2.4. Quantité de chaleur fournie par la combustion ($Q_{fournie}$) *41*
IV.2.5. Composition des fumées *42*
IV.2.6. Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{fumées}$) *44*
IV.2.7. Quantité de chaleur perdue par les parois *49*
IV.2.8. Rendement thermique des fours *50*
IV.3. ETUDE TECHNICOECONOMIQUE ***52***
IV.3.1. Energie récupérée *52*
IV.3.2. Calcul du gain d'argent *52*
CONCLUSION ***53***
CONCLUSION GENERALE ***55***
REFERENCES

Liste des figures

Figure I.1. Fours cabines à tubes horizontaux. *5*
Figure I.2. Fours cylindriques verticaux. *6*
Figure I.3. Schéma simplifié d'un four classique. *9*
Figure I.4. Préchauffeur d'air intégré. *10*
Figure I.5. Préchauffeur d'air séparé. *11*
Figure III.1. Préchauffage du produit brut ou de charge (condensat). *23*
Figure III.2. Préfractionnement *24*
Figure III.3. Distillation atmosphérique. *25*
Figure III.4. Distillation sous vide. *26*
Figure III.5. Stabilisation des essences. *27*
Figure III.6. Dépropaniseur. *28*
Figure III.7. Unité de séchage de Butane. *29*
Figure IV.1. Quantité de chaleur fournie par les trois fours avec et sans APH. *42*
Figure IV.2. Quantité de chaleur perdue par les fumées *49*
avec et sans APH dans les trois fours. *49*
Figure IV.3. Quantité de chaleur perdue par les parois *50*
dans les trois fours avec et sans APH. *50*
Figure IV.4. Les rendements thermiques des fours. *51*

Liste des tableaux

Tableau II.1. Température d'inflammation de quelques combustibles usuels. 16
Tableau II.2. Quelques réactions de combustion. 17
Tableau III.1. Quantités des constituants des fumées 33
de la combustion réelle. 33
Tableau III.2. La chaleur spécifique de chaque constituant. 35
Tableau IV.1. Données du four F-101. 38
Tableau IV.2. Données du four F-102. 39
Tableau IV.3. Données du four F-103. 39
Tableau IV.4. Compositions volumiques du gaz de combustion. 40
Tableau IV.5. PCI des composants du gaz de combustion. 41
Tableau IV.6. Chaleur fournie par la combustion. 41
Tableau IV.7. Les valeurs théoriques de la composition des fumées. 42
Tableau IV.8. Les quantités des constituants des fumées. 43
Tableau IV.9. La composition réelle des fumées dans le Four 100-F-101. 43
Tableau IV.10. La composition réelle des fumées dans le Four 100-F-102. 43
Tableau IV.11. La composition réelle des fumées dans le Four 100-F-103. 44
Tableau IV.12. Les débits molaires des fumées. 44
Tableau IV.14. Chaleur perdue par les fumées du Four F102 avec APH. 45
Tableau IV.15. Chaleur perdue par les fumées du Four F103 avec APH. 46
Tableau IV.17. Cchaleur perdue par les fumées du Four F102 sans APH. 47
Tableau IV.18. Chaleur perdue par les fumées du Four F103 sans APH. 48
Tableau IV.19. Tableau récapitulatif des chaleurs perdues par les fumées. 48
Tableau IV.21. Les valeurs du rendement thermique de chaque four. 50

Liste des abréviations

APH : Air prehaiter (préchauffeurs d'air).

CNPC : China National Petroleum Corporation.

CPECC : China Petroleum Engineering and Construction Corporation.

DA : Dinar Algérien.

F : Four.

F101 : Four F-101 rebouilleur de la colonne de préfractionnement.

F102 : Four F-102 préchauffeur de la colonne de distillation atmosphérique 100-T-103.

F103 : Four F-103 : rebouilleur de la colonne de distillation atmosphérique 100-T-103.

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié

Jet A1 : Carburant pour aviation (Kérozène).

n : Débit molaire.

η : Rendement Thermique.

Nox : Oxyde d'azote.

PCI : Pouvoir calorifique inferieur.

PCS : Pouvoir calorifique supérieur.

Ppm : Partie par million.

Q : Quantité de chaleur.

RA2K : La Raffinerie du Condensat de Skikda.

T : Tour.

U : Unité.

V_C : Débit du gaz combustible.

Yi : % molaire du constituant i.

Introduction générale

Introduction générale

Le développement des pays repose en grande partie sur le pétrole brut, une ressource énergétique essentielle. L'Algérie, qui accorde une grande importance à ce développement, a lancé l'exploitation de ses ressources en hydrocarbures. Plusieurs raffineries ont vu le jour notamment celles d'Alger, Skikda, Hassi Massoud, In Amenas, Adrar et Arzew.

Le projet RA2K, également connu sous le nom de complexe de Topping condensat de Skikda, s'inscrit dans le programme du pôle industriel pétrochimique local, l'accord a été conclu en 2005 et a débuté son exploitation en 2009. Ce projet met en évidence l'importance du condensat dans le domaine énergétique.

Au sein du complexe RA2K Skikda, la chaleur est indispensable pour le processus de raffinage du condensat. Ce complexe générait de la chaleur pour la distillation ou le chauffage par le biais de la chaleur produite par les échangeurs thermiques et celle provenant des fours.

L'objectif principal de ce travail est l'estimation des rendements énergétiques des fours F 101, F 102 et F 103 dans l'unité Topping avec et sans préchauffeurs d'air. Le système préchauffeur d'air (APH) qui a été récemment introduit dans la raffinerie de Skikda permet de préchauffer l'air de combustion et de réduire la température des fumées, améliorant ainsi les performances thermiques des trois fours, il met en évidence les gains énergétiques et la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Dans ce contexte ce mémoire est rédigé, il comprend quatre chapitres, précédés par une introduction générale et suivis par une conclusion générale.

Chapitre I : Il est consacré aux généralités (définition, rôle, types, domaines) du four et leurs différents éléments. Nous avons ensuite passé en revue le composant essentiel de notre étude (L'APH).

Chapitre II : Il aborde la combustion, phénomène essentiel au fonctionnement des fours, en présentant ses conditions avec un aperçu sur quelques grandeurs, à savoir : pouvoirs calorifiques inférieur et supérieur, pouvoir fumigène, humidité relative,…etc.

Chapitre III : Il traite les méthodes de calcul du rendement des fours, nous identifierons aussi les différentes unités du complexe, en présentant également une description du processus de distillation.

Chapitre IV : Ce chapitre expose les résultats obtenus en évaluant la chaleur perdue et fournie, ainsi que les rendements thermiques des fours avec et sans préchauffeur d'air « APH ».

Chapitre I

Généralités sur les fours

Chapitre I
Généralités sur les fours

I.1. Introduction

Au sein des unités industrielles, l'augmentation de la température des charges est réalisée 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 **[1]**.

Le but de ce chapitre est donner un aperçu général sur les fours, essentiellement leur mode de fonctionnement et leurs caractéristiques principales. Nous traiterons également l'élément le plus important dans notre mémoire ; les préchauffeurs d'air.

I.2. Définition et rôle des fours

Les fours sont des équipements clés pour l'industrie pétrolière. 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 **[1]**.

Les fours sont des appareils dans lesquels le chauffage des fluides s'effectue par les fumées produites par la combustion d'un combustible liquide ou gazeux.

Ils sont dits à chauffage direct quand la chaleur des fumées est cédée directement au fluide froid qui circule dans un serpentin tubulaire. Ces fours sont distincts des fours à chauffage indirect, dans lesquels le fluide à réchauffer circule dans un faisceau tubulaire baignant dans un fluide chaud, lui-même chauffé directement par les fumées du combustible **[2]**.

Le rôle joué par les fours dans les unités pétrolières et pétrochimiques est important. La défaillance du four ou tout simplement de l'un de ses accessoires entraine des arrêts de l'unité. Les fours sont incorporés au train d'échange afin d'apporter la chaleur complémentaire pour réchauffer un fluide ou produire une réaction de dissociation des molécules d'une charge **[2]**.

I.3. Types des fours

I.3.1. Fours cabines à tubes verticaux

Dans ces fours, la forme générale de la zone de radiation est celle d'un parallélépipède. Les brûleurs sont situés sur la sole, la surface d'échange couvre les parois verticales latérales. Parfois la chambre de combustion est divisée en plusieurs cellules, par des rangées de tubes parallèles à une des faces des parois latérales **[3]**.

I.3.2. Fours cabines à tubes horizontaux

Dans ces fours la forme générale de la zone de radiation est celle d'un parallélépipède, dont la plus grande longueur est horizontale. Les tubes sont placés horizontalement le long des parois latérales les plus longues. Les brûleurs sont situés sur la sole, ou sur la partie inférieure des murs latéraux les plus longs, ou encore sur les murs d'extrémités ne recevant pas les tubes **[3]**.

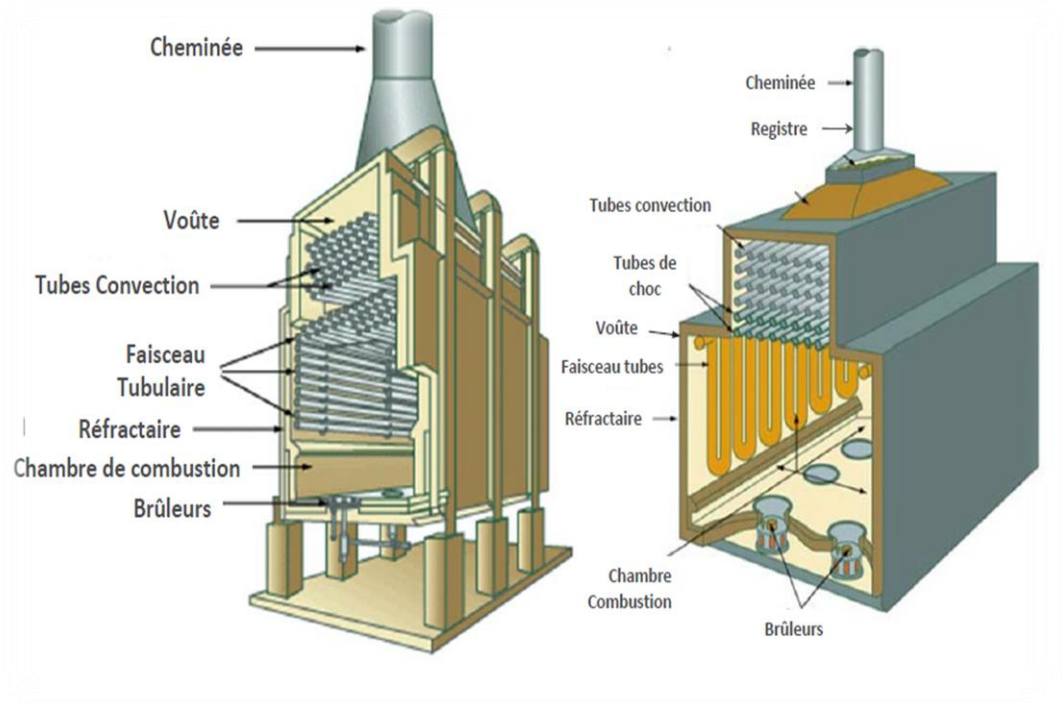


Figure I.1. Fours cabines à tubes horizontaux.

I.3.3. 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 **[4]**.

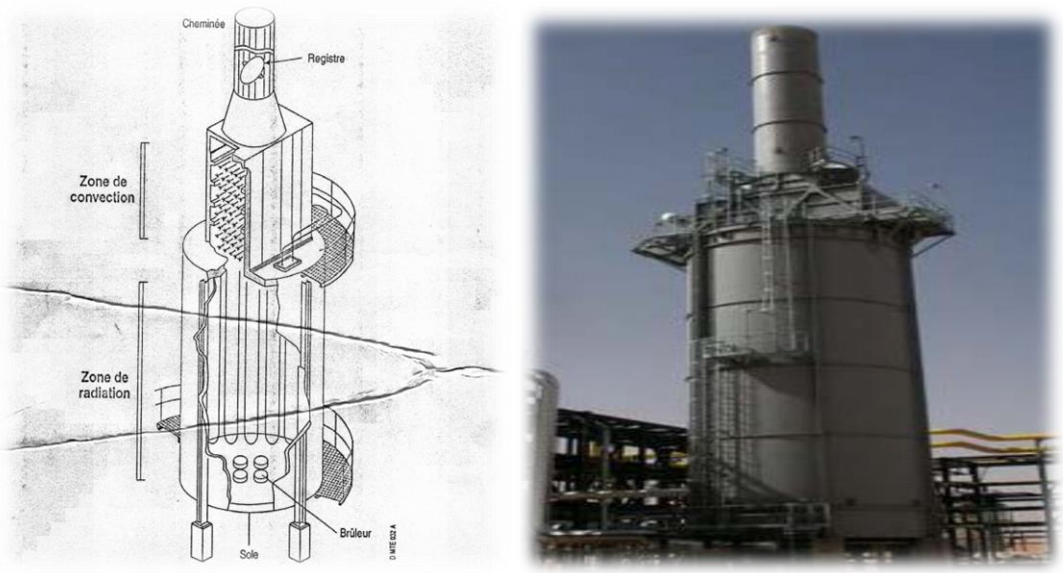


Figure I.2. Fours cylindriques verticaux.

I.4. Domaines d'applications industrielles

I.4.1. 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 comme dans le cas des réactions de reforming catalytique **[1]**.

I.4.2. Réchauffage d'un fluide avec vaporisation partielle

Dans ces fours, la charge reçoit une chaleur latente pour atteindre le niveau d'évaporation nécessaire. C'est le cas pour la plupart des fours de distillation situés au bas de la colonne. Ces fours sont caractérisés par une capacité thermique élevée **[5]**.

I.4.3. Réchauffage d'un fluide avec réaction chimique

Les fours fournissent l'énergie thermique nécessaire pour initier et contrôler les réactions de craquage, qui permettent de transformer des hydrocarbures lourds en produits plus légers **[1]**.

I.5. Eléments constitutifs d'un four

I.5.1. Zone de radiation

Elle est doublée à l'intérieur de matériau réfractaire isolant. Dans cette région, les tubes sont exposés à la flamme et reçoivent principalement la chaleur par rayonnement des gaz en combustion. La température des gaz à la sortie de la zone de radiation est élevée (entre 700 et 1100°C).

I.5.2. Zone de convection

Installée à la sortie des fumées de la chambre de combustion, elle se compose d'un assemblage de tubes disposés en parallèle ou en perpendiculaire par rapport au flux des fumées. Dans les deux cas l'objectif est d'atteindre une vitesse suffisamment élevée pour les fumées afin d'augmenter le coefficient d'échange.

La performance d'un four muni d'une zone de convection dépasse celle d'un four qui ne possède qu'une zone de radiation.

I.5.3. Faisceau tubulaire

Les faisceaux tubulaires sont généralement constitués de tubes droits, reliés entre eux par des coudes, soudés sur les tubes, ou par des liaisons appelées boites de retour, ces dernières, équipées d'un ou deux orifices fermés par des bouchons, offrent un accès facilité pour le nettoyage interne des tubes **[3]**.

I.5.4. 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 celle 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 **[1]**.

I.5.5. 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 **[1]**.

I.5.6. Cheminée

Sa forme est cylindrique, elle est placée directement sur le four ou sur une base indépendante. Elle permet d'évacuer les fumées dans l'atmosphère à une altitude suffisamment élevée.

I.5.7. Ramoneurs

Afin de maintenir propre le circuit des fumées et ainsi conserver l'efficacité des surfaces d'échange, on installe dans les zones de convection des ramoneurs. Selon la conception, on distingue :

- Appareils à soufflage d'air ou de vapeur. Ce sont des tubes rotatifs, fixes ou rétractables, comportant des buses de soufflage.
- Ramoneurs acoustiques ou subsoniques. Ce sont des appareils qui émettent des vibrations acoustiques ou infrasonores dans l'enceinte de la zone de convection **[3]**.

I.5.8. Les brûleurs

C'est la partie principale de l'équipement de chauffe, ils sont chargés de réaliser le mélange intime air – combustible contribuant à la bonne qualité de la combustion. Leur intérêt est de fournir de la chaleur, ou de détruire ou transformer certains produits **[6]**. Il a donc un rôle déterminant dans la qualité de la combustion, essentiellement dans l'émission de polluants ou d'imbrulés dans les fumées **[7]**.

Le rôle du brûleur est en général double :

- Assurer le mélange carburant-comburant dans les proportions choisies.
- Réaliser la combustion de ce mélange dans les conditions optimales (allumage et maintien de la flamme, combustion complète).

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 **[1]**.

I.5.8.1. Types de brûleurs

A. *Classification selon le combustible*

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

- **Brûleurs à gaz :** deux types existent, ceux à prémélange (à air induit) et ceux sans prémélange.
- **Brûleurs à combustible liquide :** le combustible liquide (huile) est pulvérisé avant de se mélanger avec l'air de combustion.
- **Brûleurs mixtes :** ils peuvent être alimentés soit en combustible gazeux, soit en combustible liquide **[1]**.

B. *Classification selon la circulation d'air*

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

- **Brûleurs à air induit par tirage naturel :** leurs qualités sont la robustesse, l'exploitation facile, le fonctionnent avec de larges variations de quantité 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.
- **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 **[1]**.

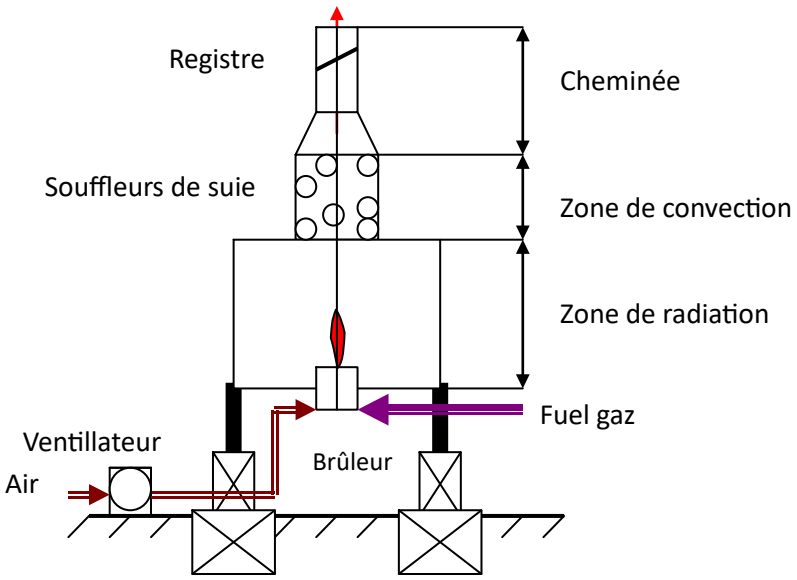


Figure I.3. Schéma simplifié d'un four classique.

I.6. Les préchauffeurs d'air

I.6.1. Définition

Un préchauffeur d'air est un dispositif d'échange de chaleur utilisé dans les systèmes de chauffage, généralement utilisé pour améliorer l'efficacité énergétique d'un système. Sa fonction principale est de préchauffer l'air entrant dans la chambre de combustion, réduisant ainsi la consommation de carburant et minimisant les émissions **[1]**.

I.6.2. Types de préchauffeurs

A) ***préchauffeur d'air intégré***

Il s'agit d'un échangeur composé de tubes en acier, positionné dans la zone de convection du four et dont la composition est identique à celle des zones de convection conventionnelles pour le réchauffement de fluides de procédés.

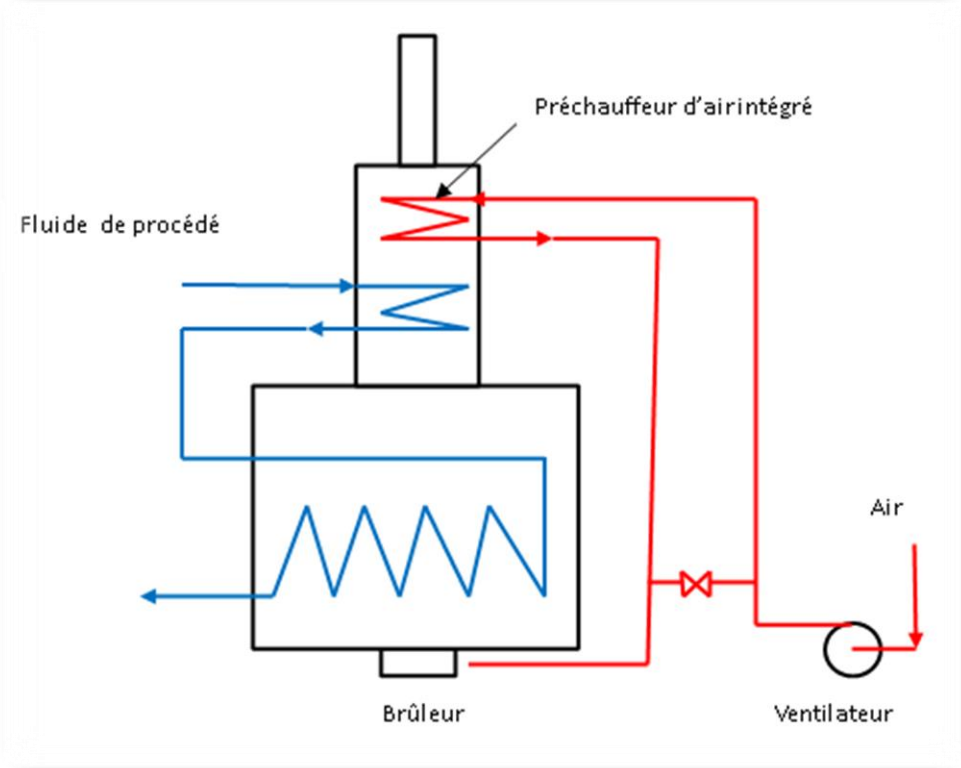


Figure I.4. Préchauffeur d'air intégré.

B) ***Préchauffeur d'air séparé***

- **Le préchauffeur d'air statique :** Il est constitué de tubes en fonte d'épaisseur importante comportant des ailettes sur les deux circuits (fumées et air).
- **Le préchauffeur d'air dynamique ou rotatif :** Le plus fréquemment utilisé, est constitué par un rotor recevant un empilage de tôles minces gaufrées (appelées aussi lamelles). Un moteur assure la rotation du rotor (1 à 2 tours par minute) **[1].**

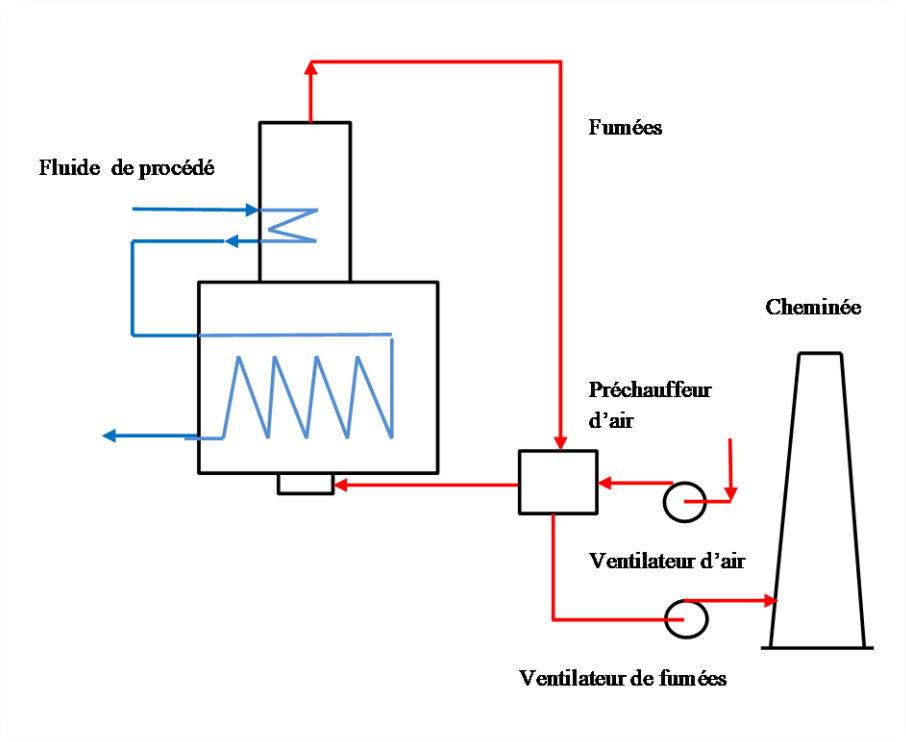


Figure I.5. Préchauffeur d'air séparé.

I.6.3. Principe de fonctionnement

• Les préchauffeurs d'air sont généralement constitués d'une série de tubes ou de surfaces d'échange thermique qui entrent en contact avec des gaz d'échappement ou des produits de combustion à haute température.

• Lorsque l'air froid traverse le préchauffeur, il entre en contact avec les surfaces chaudes, provoquant ainsi son échauffement.

• Les gaz d'échappement ou les produits de combustion à haute température perdent une partie de leur chaleur en se refroidissant.

• L'air préchauffé est ensuite introduit dans la chambre de combustion, où il se mélange au carburant et s'enflamme, fournissant ainsi l'effet de chauffage nécessaire **[8]**.

Chapitre II

La réaction de combustion

Chapitre II
La réaction de combustion

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous penchons vers le phénomène principal pour un fonctionnement des fours, à savoir « la combustion ».

Nous commencerons par des généralités sur la combustion, les différentes conditions pour assurer cette réaction, avec un aperçu sur l'humidité relative étant un paramètre principal dans le calcul des rendements des fours.

II.2. Définition

La combustion est une réaction exothermique d'oxydoréduction. Lorsque la combustion est vive, elle se traduit par une flamme ou par une explosion (déflagration, voire détonation si le front de flamme dépasse la vitesse du son) **[9]**.

La combustion recouvre l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent au cours de l'oxydation complète ou partielle d'un combustible (ou carburant) par un comburant. Ce sont des réactions d'oxydoréduction globalement exothermiques. Le corps oxydé, qui perd un ou plusieurs électrons, est le combustible et le corps réduit, qui gagne un ou plusieurs électrons, est le comburant **[10]**.

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

- un comburant (l'oxygène).

- un carburant (le combustible gazeux ou liquide).

- une source d'inflammation (la flamme) **[1]**.

II.3. Conditions de combustion

- Faire affluer sur le combustible l'air en proportion convenable : si le volume d'air est insuffisant, la combustion est forcément incomplète ; s'il est en excès, la température s'abaisse. En pratique, il est préférable d'assurer une combustion parfaite et d'envoyer un léger excès d'air.
- Mélanger intimement l'air et les gaz combustibles afin de déterminer les contacts nécessaires à la combinaison.

- Maintenir une température assez élevée dans le foyer : un refroidissement excessif peut empêcher la combinaison des gaz avec l'oxygène de l'air. Une température très considérable a aussi des inconvénients **[11]**.
- Temps de séjour : une durée de séjour suffisante des gaz dans la zone de combustion est essentielle pour garantir une combustion complète et optimiser l'efficacité énergétique.
- Pression : Le contrôle rigoureux de la pression à l'intérieur du four est nécessaire, car celle-ci influence directement les conditions de combustion (vitesse de réaction, stabilité des flammes, etc.).
- Qualité du combustible : Les propriétés du combustible (pouvoir calorifique, teneur en impuretés, humidité) ont un impact significatif sur l'efficacité de la combustion et le niveau d'émissions polluantes.
- Systèmes de contrôle : Des dispositifs de régulation avancés (capteurs, automates) sont indispensables pour piloter la combustion en temps réel, minimiser les rejets et garantir à la fois sécurité et performance.

II.4. Types de combustion

- **Combustion neutre** : est dite aussi théorique ou stœchiométrique, si l'air comburant est en quantité suffisante et strictement nécessaire à la combustion complète de l'unité de combustible. Les fumées ne contiennent pas d'oxygène **[12]**.
- **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) **[13]**.

II.5. Réactifs et produits de combustion

La combustion met en jeu deux types de réactifs principaux :

- Le combustible (ou carburant) : représente la substance énergétique consommée lors de la réaction. Il peut s'agir d'hydrocarbures (comme le méthane ou le propane), de carbone

élémentaire, de soufre ou d'hydrogène, existant sous différentes formes physiques (gazeuse, liquide ou solide).

- Le comburant : généralement le dioxygène présent dans l'air, agit comme agent oxydant nécessaire à la réaction. L'air ambiant, composé d'environ 21% d'oxygène et 79% d'azote (en volume), sert habituellement de source de comburant.

Les produits issus de la combustion varient selon les conditions de la réaction :

Une combustion complète, réalisée en présence d'un excès d'oxygène, génère principalement du dioxyde de carbone et de l'eau, tout en libérant de l'énergie thermique.

Une combustion incomplète, survenant lorsque l'apport en oxygène est insuffisant, produit du monoxyde de carbone, de la suie et divers hydrocarbures non brûlés. La présence d'impuretés dans le combustible, comme le soufre, peut entraîner la formation de dioxyde de soufre, tandis que les hautes températures favorisent l'apparition d'oxydes d'azote **[1]**.

II.6. Les combustibles

II.6.1. Définition

Les combustibles sont des matières capables de bruler en présence d'un comburant (comme le dioxygène de l'air) pour produire de la chaleur et souvent de la lumière. On utilise les combustibles pour chauffer, cuisinier, ou faire fonctionner des moteurs.

II.6.2. Types de combustibles

A) Combustibles solides : On distingue trois grandes familles de combustibles selon leur origine, naturelle, artificielle ou manufacturée et les déchets domestiques et industriels (tourteaux divers, rognures de papier, etc.).

B) Combustibles liquides : On distingue dans les combustibles liquides :
   - Les coupes légères issues de la distillation ou le craquage du pétrole et destinées aux carburants des véhicules routiers (essences et gazoles), des aéronefs (kérosènes) et des chaudières.
   - Les carburants issus de l'industrie agricole (biodiesels etc.).
   - Les huiles minérales loures (fuels lourds, mazout), et les produits lourds en provenance du pétrole.
   - Les goudrons de houille.

C) Combustibles gazeux : parmi les combustibles gazeux on distingue :
   - Les combustibles naturels.
   - Les gaz de gazogènes, de fours à coke et de hauts fourneaux.

- Les gaz de cracking (décomposition par la chaleur des hydrocarbures à longues chaines) **[14]**.

II.6.3. Propriétés des combustibles

- Masse volumique : importante pour le stockage, le transport et le calcul d'énergie par volume.
- Température d'ignition : c'est la température maximale à laquelle un combustible s'enflamme spontanément en présence d'un comburant (souvent l'oxygène). Le tableau II.1 donne les températures d'auto inflammation de quelques combustibles usuels gazeux, liquides ou solides.
- Composition chimique : proportion en carbone (C), hydrogène (H), soufre (S), oxygène (O), azote (N), pour affect le rendement énergétique et la pollution.
- Teneur en humidité : présente surtout dans les combustibles solides (ex. le bois), pour réduit le pouvoir calorifique car l'eau absorbe une partie de la chaleur pour s'évaporer.
- La viscosité : Indique la fluidité du combustible, influence le mode d'injection et la combustion.
- Teneur en cendres : résidus non combustibles après combustion, affecte la maintenance des équipements (encrassement, élimination).

Tableau II.1. Température d'inflammation de quelques combustibles usuels.

Combustible	Température d'inflammation (°C)	Combustible	Température d'inflammation (°C)
Hydrogène	550	**Carbone**	700
Oxyde de carbone	300	**Charbon de terre**	325
Méthane	650	**Charbon de bois**	360
Gaz de four à coke	800	**Coke**	700
Hydrocarbures lourds	600-800	**Tourbe**	225

II.7. Réaction de combustion

Dans le tableau ci-dessous, nous donnons quelques exemples de réactions de combustion avec les valeurs de la chaleur dégagée.

Tableau II.2. Quelques réactions de combustion.

Elément	Réaction	Chaleur dégagée (kcal/mol)	
		Eau vapeur	Eau liquide
Carbone	$C + O_2 = CO_2$	97,6	--
Carbone	$C + 1/2\ O_2 = CO$	29,4	--
Soufre	$S_2 + O_2 = SO_2$	138,6	--
Soufre	$2S_2 + 3\ O_2 = 2SO_3$	183,6	--
Hydrogène	$H_2 + 1/2O_2 = H_2O$	58,2	69,1
Méthane	$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	192,5	214,3
Ethane	$C_2H_6 + 7/2O_2 = 2CO_2 + 3H_2O$	340,9	373,6
Propane	$C_3H_8 + 5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O$	485,1	528,7
Butane	$C_4H_{10} + 13/2O_2 = 4CO_2 + 5H_2O$	625,7	680,2

II.8. Facteurs influant sur l'efficacité de la combustion

L'efficacité de la combustion est déterminée par une grande variété de caractéristiques :

- Chimie des carburants : La quantité d'énergie et les émissions libérées par une réaction de combustion sont principalement déterminées par la composition chimique et moléculaire du carburant oxydé. La composition élémentaire du carburant, et en particulier ses composants non constitués d'hydrocarbures, détermine les types d'émissions produites. D'importants travaux sont en cours dans le domaine de la chimie des carburants pour concevoir et améliorer de nouvelles solutions de carburants, comme les gaz synthétiques.
- Proportion carburant/oxygène : Lors d'une combustion, la réaction d'oxydation est déterminée par la quantité d'oxygène disponible pour réagir avec le carburant. L'objectif est d'obtenir un mélange parfaitement proportionné.
- Température : Si la température est trop basse, seule une fraction de la quantité totale de carburant sera oxydée, et si la température est trop élevée, il est possible que des réactions indésirables générant des NOx se produisent.
- Pression : Lors d'une réaction de combustion, plus la pression des gaz est élevée, plus la réaction se produit rapidement et plus la quantité de chaleur générée est importante.
- Mélange : Pour que la combustion ait lieu, les différentes molécules impliquées dans la réaction chimique doivent être très proches les unes des autres. De ce fait, la conception du processus de mélange est cruciale pour l'efficacité de la réaction.

- Forme et stabilité de la flamme : Comme la réaction de combustion a lieu sur le front de flamme, la forme et la stabilité de la flamme elle-même sont des éléments cruciaux dans la conception d'un système de combustion **[15]**.

II.9. Pouvoir calorifique supérieur PCS

C'est la quantité de chaleur exprimée en kcal dégagée par la combustion d'un kilogramme ou d'un mètre cube de combustible à la température de 0 °C et la pression de 760 mm Hg. Les produits de la combustion sont ramenés à 0 °C et l'eau provenant de la combustion est complètement condensée **[16]**.

II.10. Pouvoir calorifique inférieur PCI

C'est la quantité de chaleur exprimée en kcal dégagée par la combustion complète d'un kilogramme ou d'un mètre cube de combustible dans les mêmes conditions que celles du pouvoir calorifique supérieur, mais l'eau dans ce cas est à l'état vapeur **[16]**.

II.11. Pouvoir comburivore

On désigne par pouvoir comburivore d'un combustible la quantité d'air sec comburant nécessaire et suffisante pour assurer la combustion complète de l'unité de quantité de ce combustible **[17]**.

II.12. Pouvoir fumigène

D'une manière générale, le pouvoir fumigène est la quantité de produits de combustion gazeux émise par la combustion stœchiométrique théorique de l'unité de volume ou de masse de combustible.

En général, le pouvoir fumigène s'exprime en Nm^3 de produits de combustion ou fumées par Nm^3 de combustible gazeux et en Nm^3 de fumées par kg de combustible liquide ou solide **[18]**.

II.13. Excès d'air

L'excès d'air correspond généralement au pourcentage d'air supplémentaire fourni par rapport à la quantité nécessaire pour une combustion stœchiométrique (ou complète).

II.14. Humidité relative

L'humidité relative est la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air par rapport à la quantité maximale de vapeur d'eau que cet air peut contenir à température et pression constantes. On l'exprime en pourcentage. En serriculture, c'est généralement cet indice que l'on mesure. Pour une même humidité relative, deux serres à des températures différentes ne contiendront pas la

même quantité de vapeur d'eau. Si on refroidit l'air (par exemple, en fin de journée), l'humidité relative augmente, car en refroidissant l'air ne peut contenir autant de vapeur d'eau **[19]**.

Chapitre III

Suivi des procédés et méthodes de calcul

Chapitre III

Suivi des procédés et méthodes de calcul

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons les formules mathématiques qui permettent le calcul du rendement des fours de la raffinerie RA2K : F-101, F-102, F-103. Nous passerons en revue le procédé de distillation atmosphérique et sous vide afin d'obtenir les différentes coupes qui peuvent être commercialisées, et compte tenue de l'importance de l'entreprise d'accueil (SONATRACH), nous avons consacré la première partie à la présentation du complexe Topping (RA2K) et la description de l'unité 100.

III.2. La raffinerie de condensat RA2K

III.2.1. Description de la raffinerie

Le complexe Topping de condensat a été réalisé par la société chinoise China Petroleum Engineering and Construction Corporation (CPECC) filiale de l'entreprise China National Petroleum Corporation (CNPC) **[20]**. Il est situé dans la zone industrielle de Skikda, à l'Est de la ville de Skikda.

Le complexe 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 **[20]**.

III.2.2. Les équipements de la raffinerie

III.2.2.1. Réservoirs

- **Réservoir de forme cylindrique (aérien)**
  - Les réservoirs à toit fixe en forme de dôme (DRT), utilisés pour le stockage de gasoil léger et lourd.
  - Les réservoirs à toit fixe avec écran flottant à l'intérieur (IFRT), utilisés pour le stockage du kérosène.
  - Les réservoirs à toit flottant (FRT simple pont et double pont), utilisés pour le stockage du condensat et du naphta.
- **Réservoirs sphériques**
  - Capacités sphériques adaptées pour le stockage des gaz sous pression comme le butane (C_4H_{10}).

III.2.2.2. Les fours

Il existe trois fours dans la raffinerie RA2K : F-101, F-102, F-103.

- Deux fours rebouilleurs pour le préfractionné et la tour atmosphérique.
- Un four de charge qui a comme objectif d'augmenter la température des résidus du préfractionné avant qu'ils soient injectés dans la colonne atmosphérique.

III.2.2.3. Les échangeurs

- Echangeurs tubulaires ou faisceau-calandre.
- Echangeurs à plaques.
- Les aéroréfrigérants **[21]**.

III.3. Conception générale de la raffinerie

III.3.1. Unité Topping de Condensât (U100)

C'est l'unité principale de la raffinerie RA2K. Elle est conçue pour une capacité de traitement de 5 000 000 T/an de condensat pendant une période continue de 330 jours par an **[22]**.

Les produits finis de l'unité de production sont : butane, naphta, Jet A1 (kérosène)، gasoil léger et gasoil lourd.

III.3.2. Unité de traitement du kérosène (U200)

Cette unité est destinée à la purification du kérosène produit par la colonne de distillation atmosphérique T-103. Elle comprend trois parties :

- Traitement de kérosène.
- Traitement de résidus caustique.
- Préparation et stockage de soude caustique / acide, ainsi le transfert **[23]**.

III.3.3. Unité de stockage et de transfert (U300)

L'unité 300 assure la réception, le stockage et l'alimentation de condensat pour les unités de production, ainsi que la réception, le stockage et le transfert de tous les produits finis **[24]**.

III.3.4. Système de torche (U400)

Situé à une distance de 500 m de l'unité principale avec une capacité de de 528,8 t/h, ce système a pour rôle d'assurer l'évacuation du gaz combustible en cas d'urgence et en fonctionnement normal **[25]**.

L'unité 400 est composée d'un ballon tampon 400-V-001 dont le rôle est de prévenir l'entraînement de condensats, un second ballon 400-V-002 équipé d'un arrête-flamme, ainsi qu'une tête de torche 400-FS-001.

III.3.5. Les utilités (U500)

Les principales utilités requises pour la mise en exploitation du complexe sont le gaz naturel, l'azote, l'électricité, l'eau industrielle, la vapeur et l'air comprimé **[20]**.

L'unité 500 comporte les annexes de l'usine :

- 501 : Unité de traitement des eaux usées.
- 502 : Unité d'alimentation en eau de refroidissement.
- 503 : Unité d'alimentation et de drainage d'eau potable.
- 504 : Unité du réseau anti-incendie.
- 505 : Unité d'alimentation d'air comprimé **[21]**.

III.4. Procédé de distillation

III.4.1. Préchauffage du produit brut ou de charge (condensat)

La transmission de chaleur se fait par les échangeurs. Le condensat à basse température 30°C est préchauffé par 8 niveaux d'échangeurs de chaleur **[21]**.

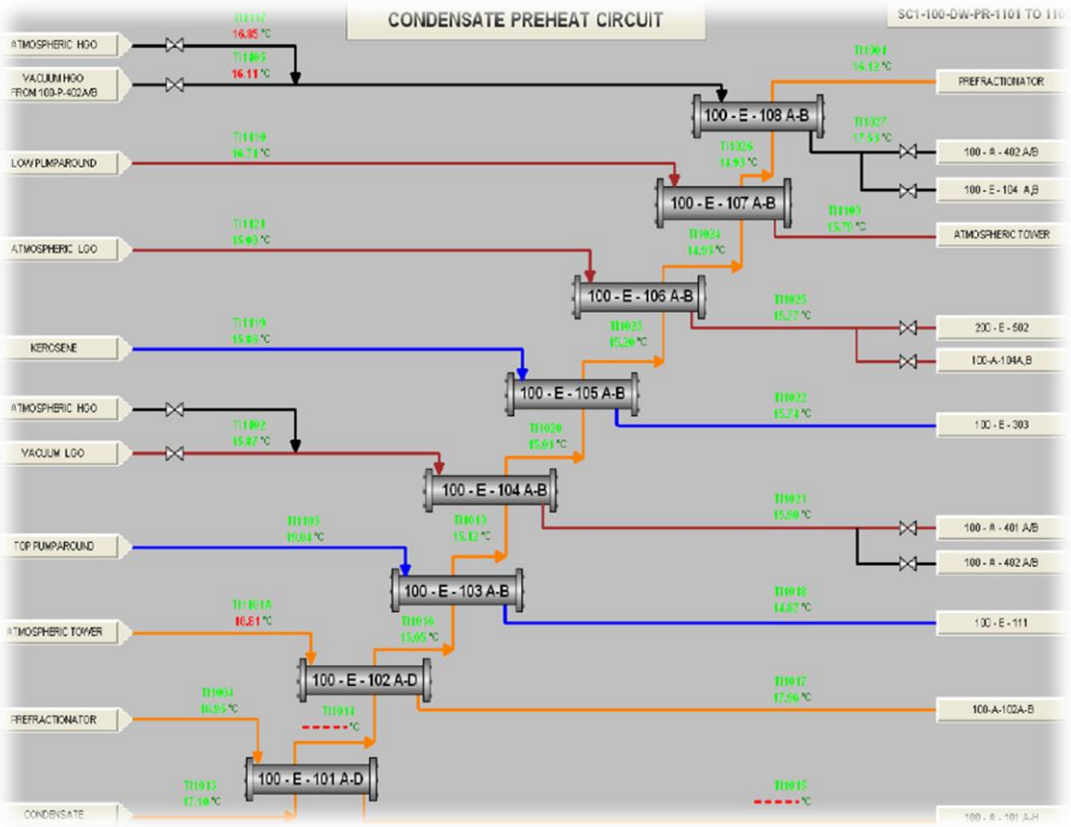


Figure III.1. Préchauffage du produit brut ou de charge (condensat).

III.4.2. Préfractionnement

Le but de cette étape est de faciliter l'opération de distillation de la tour atmosphérique (T103).

La colonne 100-T-101 (préfractionneur) ayant 35 plateaux, et reçoit le condensat partiellement vaporisé au plateau n° 28 **[1]**, 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).

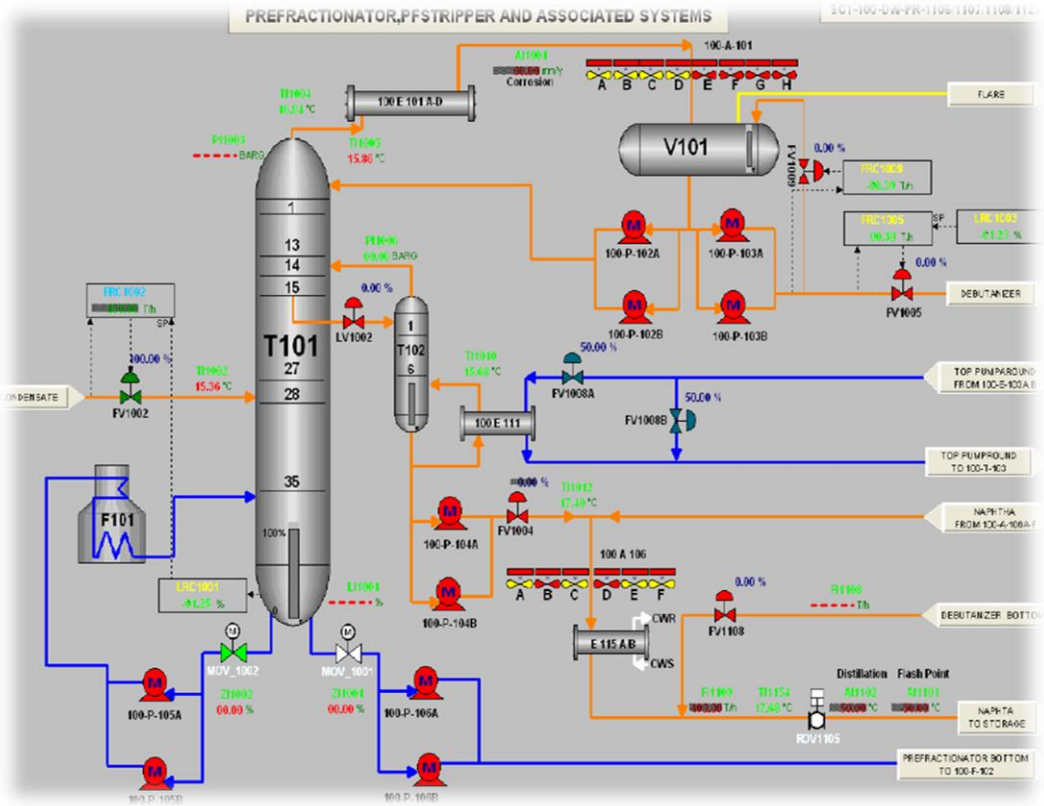


Figure III.2. Préfractionnement .

III.4.3. Distillation atmosphérique

Cette section représente le cœur de l'unité de fabrication. La colonne de distillation contient 46 plateaux, elle a deux soutirages latéraux et trois reflux circulants et elle reçoit la charge au 46ème plateau **[13]**.

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 produits suivants :

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

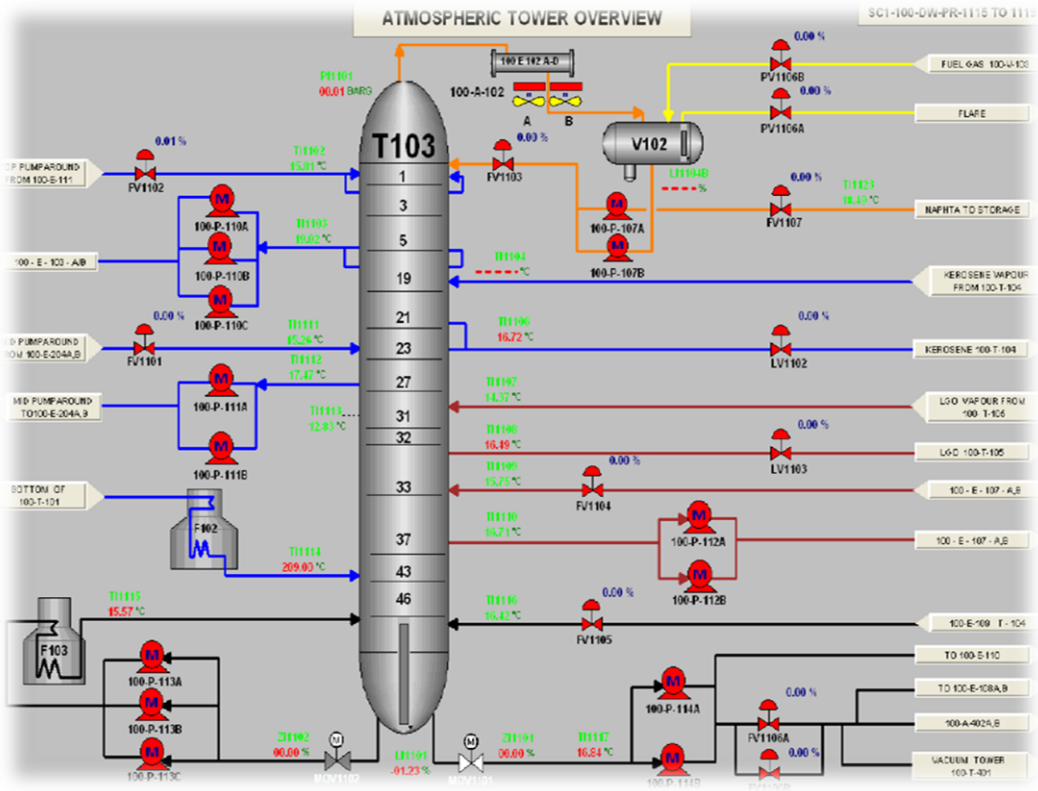


Figure III.3. Distillation atmosphérique.

III.4.4. Distillation sous vide

La colonne sous vide 100-T-401 reçoit le fond de la colonne 100-T-103. Elle a pour rôle de récupérer le composant de Gasoil léger non fractionné pendant la distillation atmosphérique.

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

- Coupe latérale (gasoil léger).
- Coupe de fond (gasoil lourd) **[13]**.

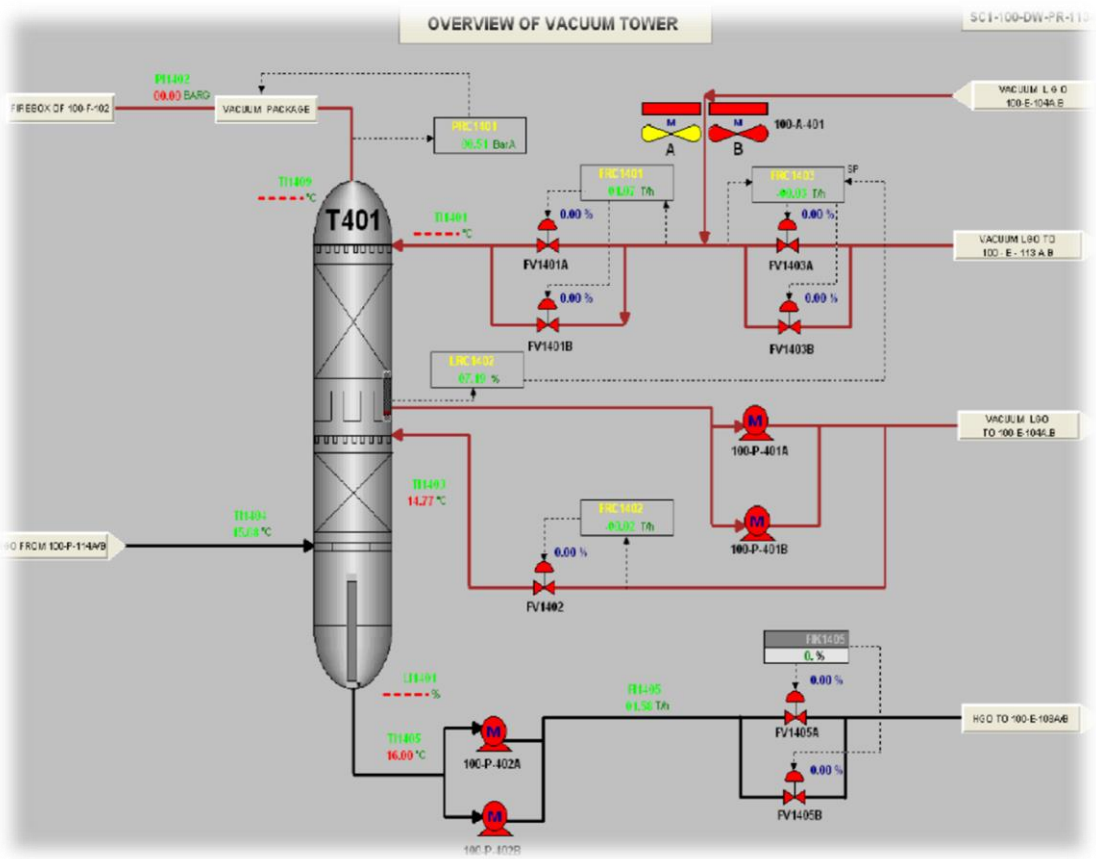


Figure III.4. Distillation sous vide.

III.4.5. Stabilisation des essences

Cette étape est assurée par la colonne 100-T-201 appelée débutaniseur ou colonne de stabilisation, elle est équipée de 50 plateaux, l'alimentation est effectuée au plateau n° 26 **[1]**. Les produits de cette étape sont :

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

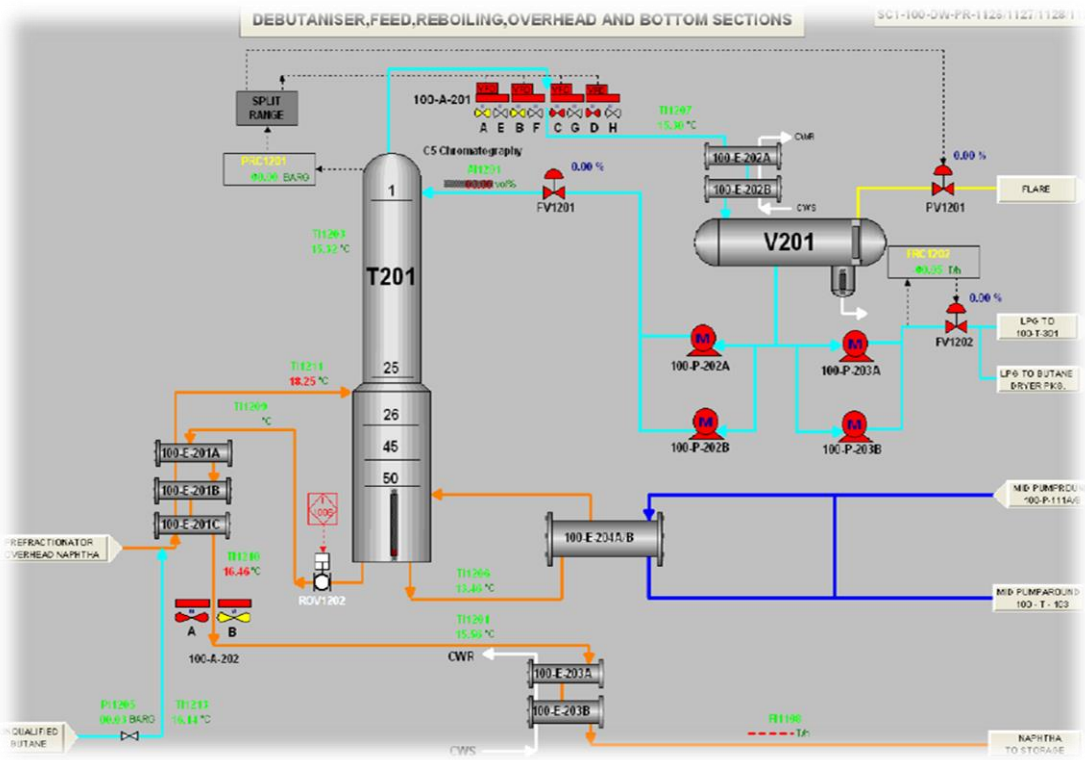


Figure III.5. Stabilisation des essences.

III.4.6. Dépropaniseur

Le dépropaniseur est conçu pour séparer le GPL brut en butane et propane contenant un peu d'éthane. Le propane est envoyé au four en tant que gaz combustible et le butane est envoyé au dispositif de séchage de butane 100-PKG-301 et est ensuite acheminé au stockage en tant que produit **[6]**.

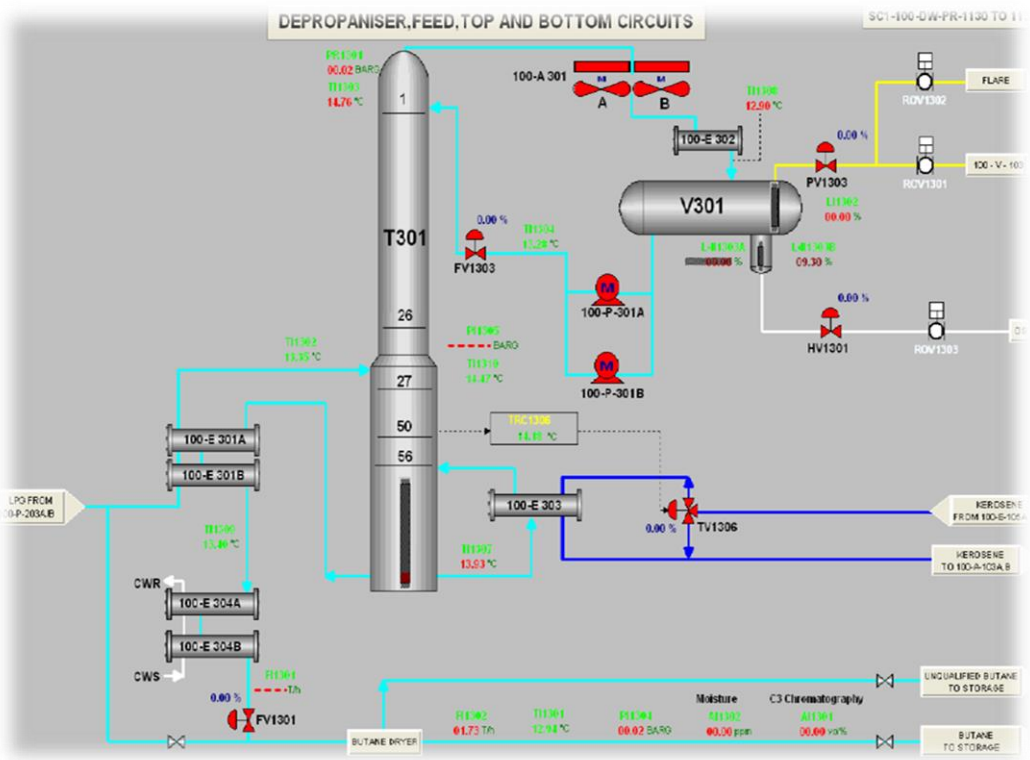


Figure III.6. Dépropaniseur.

III.4.7. Unité de séchage de Butane

L'objectif de cette étape est de sécher le butane jusqu'à 20 ppm. Le système de séchage de butane contient deux colonnes à tamis moléculaire **[6]**.

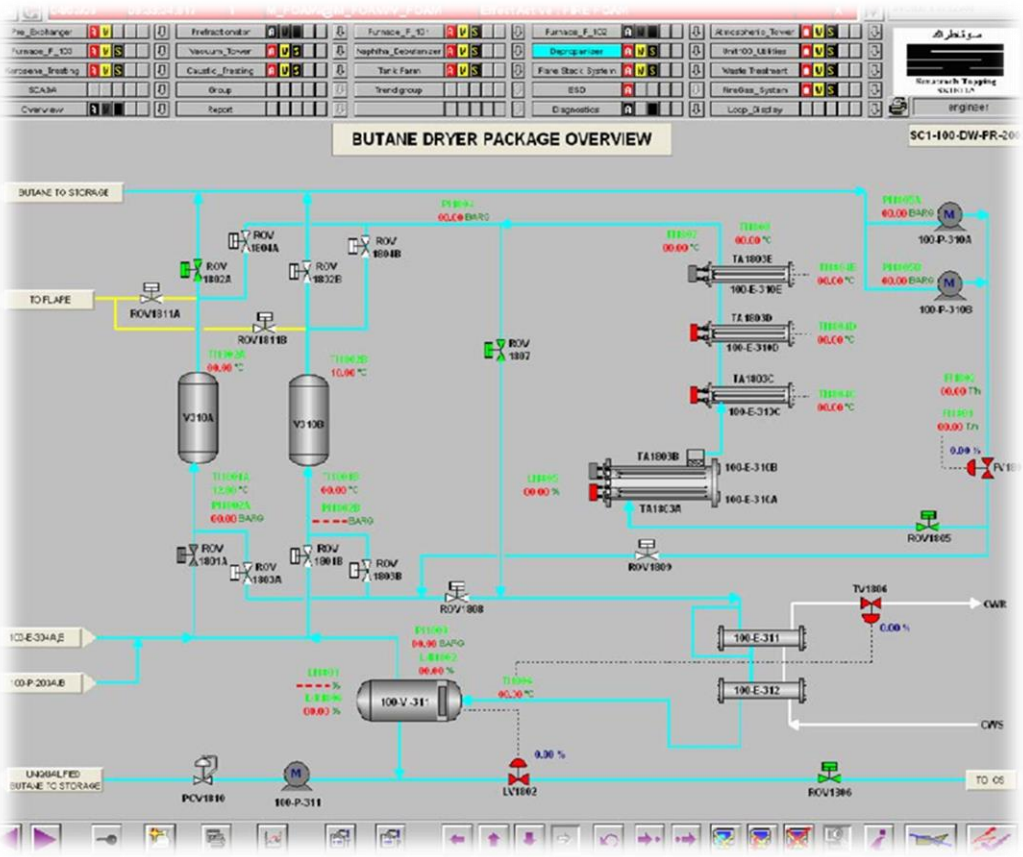


Figure III.7. Unité de séchage de Butane.

III.5. Méthodes de calcul du rendement thermique des fours

III.5.1. Définition du rendement

Le rendement (η) d'un four est défini par le rapport de la quantité de chaleur absorbée ($Q_{absorbée}$) à la quantité de chaleur fournie par la combustion ($Q_{fournie}$).

$$\eta(\%) = \frac{Q_{absorbée}}{Q_{fournie}} \times 100 \qquad \textbf{(III.1)}$$

Avec :

$Q_{fournie} = Vc \times PCI$

PCI : Pouvoir calorifique inférieur (kcal/Nm^3).

V_C : Débit du gaz combustible (Nm^3/h).

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 :

- **Pertes par les parois du four (Q_{parois})** : Ces pertes sont dues aux imperfections de l'isolation thermique par les matériaux réfractaires. Dans le cas des fours récents de grande

puissance thermique, elles représentent 1 à 2 % de chaleur libérée aux brûleurs ($Q_{entrée}$). Elles peuvent être beaucoup plus importantes dans le cas de fours anciens dont le réfractaire est défectueux.

- **Pertes par les fumées ($Q_{fumées}$)** : Ces pertes évacuent à l'atmosphère un débit de chaleur relativement important représentant en général entre 5 et 20 % de celui qui est libéré aux brûleurs **[1]**.

III.5.2. Paramètres influant sur le rendement d'un four

- **L'excès d'air de combustion :** Il augmente le débit de fumées et réduit le rendement du four. En effet, le débit d'air excédentaire consomme de l'énergie libérée par les bruleurs pour s'échauffer de la température ambiante jusqu'à la température de rejet des fumées.
- **La température de rejet des fumées :** Elle est d'autant plus élevée que la récupération d'énergie n'est pas parfaite et donc un rendement du four plus faible **[1]**.

III.5.3. Méthodes de calcul

III.5.3.1. Rendement thermique d'un four tubulaire

Deux méthodes sont généralement utilisées pour le calcul du rendement thermique (une méthode directe et une méthode indirecte). Le bilan thermique d'un four s'exprime selon l'équation (III.2).

$$Q_{fournie} = Q_{absorbée} + Q_{fumées} + Q_{parois} \quad \textbf{(III.2)}$$

A) Méthode directe

Elle est basée sur la détermination de la quantité de chaleur fournie par la combustion et celle absorbée par le fluide de procédé, notamment lorsque d'autres fluides externes interviennent, comme la production de vapeur d'eau dans la zone de convection.

$$\eta(\%) = \frac{Q_{absorbée}}{Q_{fournie}} \times 100 \quad \textbf{(III.3)}$$

B) Méthode indirecte

Elle est basée sur la détermination de la quantité de chaleur fournie par la combustion et des pertes de chaleur par les parois du four et par les fumées **[1].**

$$\eta(\%) = \frac{Q_{fournie} - Q_{fumée} - Q_{parois}}{Q_{fournie}} \times 100 \quad \textbf{(III.4)}$$

Avec : $Q_{absorbée} = Q_{fournie} - Q_{fumée} - Q_{parois}$ **(III.5)**

III.5.3.2. Le Pouvoir calorifique inferieur (PCI) du mélange d'un gaz combustible

Le pouvoir calorifique inferieur (PCI) du mélange d'un gaz combustible est déterminé par la formule suivante :

$$PCI = \sum PCI_i . Y_i / 100 \qquad \textbf{(III.6)}$$

PCI_i : Le pouvoir calorifique inferieur d'un constituant (kcal/Nm^3).

Y_i : La fraction volumique d'un constituant.

III.5.3.3. Quantité de chaleur fournie par la combustion ($Q_{fournie}$)

La quantité de chaleur fournie par la combustion $Q_{fournie}$ est donnée par la formule suivante :

$$Q_{fournie} = V_c x\ PCI \qquad \textbf{(III.7)}$$

$Q_{fournie}$: La chaleur fournie par la combustion (Kcal /h).

V_C : Débit du gaz combustible (Nm^3 /h).

PCI : Pouvoir calorifique inferieur du gaz combustible (kcal/Nm^3) **[1]**.

III.5.3.4. Réactions de combustion

Les réactions de combustion qui se produisent peuvent être représentées de la manière suivante :

$$\left.\begin{array}{l}
CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O \\
C_2H_6 + 7/2\ O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O \\
C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O \\
C_4H_8 + 6O_2 \rightarrow 4CO_2 + 4H_2O \\
nC_4H_{10} + 13/2\ O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O \\
iC_4H_{10} + 13/2\ O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O \\
iC_5H_{12} + 8O_2 \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O \\
nC_5H_{12} + 8O_2 \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O
\end{array}\right\} \qquad \textbf{(III.8)}$$

III.5.3.5. Composition des fumées

Les fumées sont composées essentiellement de CO_2, H_2O et N_2. Sachant que les quantités d'air et d'azote sont données comme indiquées :

$$\left.\begin{aligned} V_{N_2} &= V_{O_2}\,\frac{79}{21} = 3{,}76\,V_{O_2} \\ V_{air} &= \frac{100}{21}V_{O_2} = 4{,}76\,V_{O_2} \end{aligned}\right\} \quad \textbf{(III.9)}$$

Les volumes V_{N_2} , V_{CO_2} et V_{H_2O} sont donnés en Nm^3 par 100 Nm^3 de gaz combustible. Ils sont calculés selon les formules suivantes :

$$\left.\begin{aligned} &V_{CO_2}\ (\text{fumées}) = V_{CO_2}\ (\text{généré par la combustion}) + V_{CO_2}\ (\text{combustible}) \\ &V_{N_2}\ (\text{fumées}) = 3{,}76V_{O_2}\ (\text{air de combustion}) + V_{N_2}\ (\text{combustible}) \\ &V_{H_2O}\ (\text{fumées}) = V_{H_2O}\ (\text{générée par la combustion}) + V_{H_2O}\ (\text{air de combustion}) \end{aligned}\right\} \quad \textbf{(III.10)}$$

La quantité d'eau dans l'air de combustion est calculée en utilisant la formule :

$$V_{H_2O}\ (\text{air de combustion}) = \frac{P° \times H\%}{Pt - P°} = 0{,}01546V_{air} \quad \textbf{(III.11)}$$

- Humidité relative H% : 66 % (météo Skikda, le jour 13/02/2025 à 10h : 40 minutes)
- Tension de vapeur de l'eau P° à 20°C : 17,4 mm Hg

A) Composition théorique des fumées

Selon les réactions de combustion précédentes et connaissant la composition du gaz combustible, nous pouvons déterminer les quantités (V_{CO_2}, V_{H_2O} et V_{O_2}) nécessaires à la combustion de 100 Nm^3/h de combustible comme suit :

A partir des réactions de la combustion **[13,6]** :

$$\left.\begin{aligned} V_{O_2} &= \left(2\,X_1 + \frac{7}{2}\,X_2 + 5X_3 + 6X_4 + \frac{13}{2}\,X_5 + \frac{13}{2}\,X_6 + 8X_7 + 8X_8\right) \times V_{gaz} \\ V_{CO_2} &= (X_1 + 2X_2 + 3X_3 + 4X_4 + 4X_5 + 4X_6 + 5X_7 + 5X_8) \times V_{gaz} \\ V_{H_2O} &= (2X_1 + 3X_2 + 4X_3 + 4X_4 + 5X_5 + 5X_6 + 6X_7 + 6X_8) \times V_{gaz} \end{aligned}\right\} \quad \textbf{(III.12)}$$

Avec : X_1, X_2, X_3…... X_n sont les fractions volumiques des constituants.

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 d'après les équations **(III.10)**.

B) Composition réelle des fumées (avec excès d'air)

Soit V_{O_2f} le volume d'O_2 dans les fumées ou bien l'excès d'air en Nm^3. Donc :

- $V_{O_2f} = V_{O_2}$ (théorique) × teneur en O_2 dans les fumées

- V_{N_2} (fumées) = 3,76 × V_{O_2} (théorique) + V_{N_2} (combustible) + 3,76 × V_{O_2f}
- V_{CO_2} (fumées) = V_{CO_2}(généré par la combustion) + V_{CO_2} (combustible)
- V_{H_2O} (fumées) = V_{H_2O}(générée par la combustion) + V_{H_2O}(air de combustion réelle) **(III.13)**
- V_{H_2O} (fumées) = V_{H_2O}(générée par la combustion) + 0,01546 V_{air}
- V_{air} de combustion = 4,76 [V_{O_2} (théorique) +V_{O_2f}]

Les quantités des constituants des fumées de la combustion réelle de 100 Nm^3 de gaz combustible, en fonction de V_{O_2f}, sont rassemblées dans le tableau suivant :

Tableau III.1. Quantités des constituants des fumées de la combustion réelle.

Constituants	**V (Nm^3 /100 Nm^3 de combustible)**
CO_2	134,79
H_2O	248,6597 + 0,0735896 V_{O_2f}
O_2	V_{O_2f}
N_2	943,07 + 3,76 V_{O_2f}
Total	1326,5197 + 4,833 V_{O_2f}

- **La composition réelle des fumées dans les fours** : Un exemple de calcul sur le four 100-F-101 et la même méthode est appliquée sur les deux autres fours.
- ***Calcul V_{O_2f} avec APH :***

V_{O_2f} = V_{O_2} (théorique) × X_{O_2} **(III.14)**

V_{O_2f} = 7,268 Nm^3

- ***Calcul V_{O_2f} sans APH :***

V_{O_2f} = V_{O_2} (théorique) × X_{O_2} **(III.15)**

V_{O_2f} = 7,542 Nm^3

III.5.3.6. Quantité de chaleur perdue par les fumées (Qfumées)

$$Q_{fumées} = n.Cp_{moy}T_f \quad \textbf{(III.16)}$$

$$Cp_{moy} = \frac{\sum Cpi.yi}{100} \quad \textbf{(III.17)}$$

Avec :

- n : Débit molaire des fumées (mol/h).
- Cp_{moy} : Chaleur spécifique moyenne des fumées (kcal/kmole.°C).
- T_f : Température de rejet des fumées (°C).
- Cp_i : Chaleur spécifique du constituant i (kcal/kmole.°C).
- Yi : Fraction molaire du constituant i.

A) Calcul des débits molaires des fumées

$$\textbf{Y débit de la fumée} = \frac{2382\frac{m3}{h} \times \textbf{La valeur totale du compositions réelles des fumées dans le Four}}{100} \quad \textbf{(III.18)}$$

Avec : 2382 m^3/h est le débit du gaz combustible

$$\textbf{Débit molaire de fumée(n)} = \frac{\textbf{Ydébit de la fumée}}{22,4}\textbf{Kmole/h} \quad \textbf{(III.19)}$$

Un exemple de calcul sur le four 100-F-101 et la même méthode est appliquée sur les deux autres fours.

- **Avec APH :**

  100 $m^3 \rightarrow$ 1361,649 m^3

  2382 $m^3/h \rightarrow Y_{\text{débit de la fumée}}$

  $Y_{\text{débit de la fumée}} = \frac{2382x1361,649}{100}$ =32434,47918 m^3/h

  $n = \frac{32434,47918}{22,4} = 1447,967$ kmol/h

B) Chaleur spécifique de chaque constituant

En se basant sur les données de l'annexe A, on peut calculer les valeurs de la chaleur spécifique moyenne avec et sans APH en utilisant la méthode de l'interpolation pour une valeur précise.

Tableau III.2. La chaleur spécifique de chaque constituant.

Fours	$T_{fumées}$ à la sortie du préchauffeur d'air	Constituant	T°C→Cp	Interpolation
Four F101 Four F102 Four F103	177°C.	CO_2	100→9,17 177→x 200→9,65	x =9,5396 kcal/kmole.°C
		H_2O	100→8,03 177→x 200→8,12	x =8,0993kcal/kmole.°C
		O_2	100→7,07 177→x 200→7,15	x =6,9931 kcal/kmole.°C
		N_2	100→6,97 177→x 200→7,00	x =7,1316kcal/kmole.°C
Four F101	414,72°C	CO_2	400→10,40 414,72→x 500→10,75	x =10,4515kcal/kmole. °C
		H_2O	400→8,34 414,72→x 500→8,47	x =8,3591 kcal/kmole.°C
		O_2	400→7,38 414,72→x 500→7,49	x =7,3961 kcal/kmole.°C
		N_2	400→7,09 414,72→x 500→7,15	x =7,0988 kcal/kmole. °C
Four F102	431,13°C	CO_2	400→10,40 431,13→x 500→10,75	x =10,5089kcal/kmole. °C
		H_2O	400→8,34 431,13→x 500→8,47	x =8,3804 kcal/kmole. °C
		O_2	400→7,38 431,13→x 500→7,49	x =7,4112 kcal/kmole. °C
		N_2	400→7,09 431,13→x 500→7,15	x=7,1086 kcal/kmole. °C
Four F103	368,28°C	CO_2	300→10,06 368,28→x 400→10,40	x=10,4634kcal/kmole. °C
		H_2O	300→8,22 368,28→x 400→8,34	x=8,3019 kcal/kmole. °C
		O_2	300→7,26 368,28→x 400→7,38	x=7,3419 kcal/kmole. °C
		N_2	300→7,04 368,28→x 400→7,09	x=7,0741 kcal/kmole. °C

III.5.3.7. Quantité de chaleur perdue par les parois

La quantité de chaleur perdue par les parois peut être estimée à 2% de la quantité de chaleur libérée par la combustion. On a utilisé la formule suivante **[6]** :

$$Q_{parois} = 2\ \%\ Q_{fournie}\ (kcal/h) \qquad \textbf{(III.20)}$$

III.5.3.8. Calcul du rendement thermique

Le calcul du rendement a été effectué à partir de l'équation **(III.4)**.

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

III.6. Etude technicoéconomique

III.6.1. L'énergie récupérée

La différence entre la consommation du combustible (ΔNv) avec et sans préchauffeur d'air **[6]** est : $\mathbf{\Delta Nv = Nvs - Nva}$ **(III.21)**

Avec :

- N_{va} : Débit du combustible consommé par les trois fours fonctionnant avec préchauffeur d'air (Nm^3/h)
- N_{vs} : Débit du combustible consommé par les trois fours fonctionnant sans préchauffeur d'air (Nm^3/h)

Calculons les débits de combustibles consommés par les trois fours.

La quantité d'énergie récupérée est calculée en utilisant la formule :

$$\mathbf{Qrécupérée = \Delta Nv\,.\,PCI} \qquad \textbf{(III.22)}$$

III.6.2. Calcul du gain d'argent

Le gain d'argent est calculé comme suit :

$$\boldsymbol{G = \Delta Nv\,.\,P} \qquad \textbf{(III.23)}$$

Avec :

G : Le gain d'argent (DA/an).

P : Le prix actuel du gaz naturel (DA/Nm^3).

Chapitre IV

Résultats et discussions

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous exposons les résultats obtenus. Nous présentons les rendements thermiques des fours F-101, F-102 et F-103 de l'unité Topping (RA2K) munis de préchauffeur d'air (APH) et sans ce système qui a été distribué récemment dans toutes les raffineries pour son caractère environnemental et économique. Le gain d'énergie a été calculé dans le cas du fonctionnement des fours en utilisant un préchauffeur d'air de combustion.

IV.2. Rendements des fours

IV.2.1. Données d'étude

Les tableaux IV.1, IV.2 et IV.3 rassemblent les données employées dans cette étude concernant les fours : F101 comme rebouilleur de la colonne de préfractionnement, le four F102 comme préchauffeur de la colonne de distillation atmosphérique et le four F103 comme rebouilleur de la colonne de distillation atmosphérique, sachant que le taux de marche étudié est 85 %.

Tableau IV.1. Données du four F-101.

Paramètres de combustion	**Avec APH**	**Sans APH**
Température des fumées à l'entrée du préchauffeur d'air (°C)	390	493,03
Température des fumées à la sortie du préchauffeur d'air (°C)	177	493,03
Teneur en O_2 dans les fumées (%)	2,91	3,02
Température de l'air de combustion à l'entrée du préchauffeur d'air (°C)	16	11,5
Température de l'air de combustion à la sortie du préchauffeur d'air (°C)	274	11,5
Débit du gaz combustible (Nm^3/h)	2382	2738
Fluide de procédé : Fond de la colonne T101 (condensat stabilisé)		
Débit du fluide (t/h)	402,2	
Température d'entrée du fluide (°C)	179	
Température de sortie du fluide (°C)	210	
Humidité relative (%)	66	

Tableau IV.2. Données du four F-102.

Paramètres de combustion	Avec APH	Sans APH
Température des fumées à l'entrée du préchauffeur d'air (°C)	390	431,13
Température des fumées à la sortie du préchauffeur d'air (°C)	177	431,13
Teneur en O_2 dans les fumées (%)	2,88	3,02
Température de l'air de combustion à l'entrée du préchauffeur d'air (°C)	16	11,5
Température de l'air de combustion à la sortie du préchauffeur d'air (°C)	274	11,5
Débit du gaz combustible (Nm^3/h)	1455	1767
Fluide de procédé : Charge de la colonne 100-T-103 (fond de la colonne de préfractionnement T101)		
Débit du fluide (t/h)	248,5	
Température d'entrée du fluide (°C)	179	
Température de sortie du fluide (°C)	195	
Humidité relative (%)	66	

Tableau IV.3. Données du four F-103.

Paramètres de combustion	Avec APH	Sans APH
Température des fumées à l'entrée du préchauffeur d'air (°C)	390	368,28
Température des fumées à la sortie du préchauffeur d'air (°C)	177	368,28
Teneur en O_2 dans les fumées (%)	2,71	3,99
Température de l'air de combustion à l'entrée du préchauffeur d'air (°C)	16	11,5
Température de l'air de combustion à la sortie du préchauffeur d'air (°C)	274	11,5
Débit du gaz combustible (Nm^3/h)	1445	1655
Fluide de procédé : fond de la colonne 10 0-T-103 (gasoil lourd atmosphérique)		
Débit du fluide (t/h)	1180	
Température d'entrée du fluide (°C)	345	
Température de sortie du fluide (°C)	354	
Humidité relative (%)	66	

- D'après les données, nous remarquons que les températures des fumées à l'entrée et à la sortie du préchauffeur sont respectivement 390 et 177°C et sont les mêmes dans les trois fours.
- La température de l'air de combustion a été augmentée de 4,5°C grâce à l'utilisation du préchauffeur.
- Les températures des fumées dans le cas d'un fonctionnement sans préchauffeur sont différentes. Dans le four 101 la température est de 493,03 °C, dans le four 102, la valeur est de 431,13 °C et concernant le four 103, la température des fumées a atteint 368,28 °C. Ces différences sont logiques du fait que la charge n'est pas la même.

IV.2.2. Composition du gaz combustible

La composition en pourcentage volumique du gaz combustible est donnée dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4. Compositions volumiques du gaz de combustion.

Constituants	**Formule chimique**	**% Volumique**
Méthane	CH_4	78,23
Ethane	C_2H_6	6,45
Propane	C_3H_8	1,98
Butène	C_4H_8	0,19
Iso butane	iC_4H_{10}	1,14
n – butane	nC_4H_{10}	7,07
iso pentane	iC_5H_{12}	0,32
n – pentane	nC_5H_{12}	0,47
Dioxyde de carbone	CO_2	0,17
Azote	N_2	3,98
Total		100

- Nous remarquons que le méthane est un composant de base dans le gaz de combustion avec une teneur de 78,23%. L'iso pentane et le n – pentane existent dans le gaz de combustion avec un pourcentage ne dépassant pas 1%, l'azote avec une teneur de 3,98% et la présence du CO_2 (0,17%).

IV.2.3. Pouvoir calorifique inferieur (PCI) des constituants du gaz combustible

Le pouvoir calorifique inférieur est une propriété qui représente la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète par unité du combustible. Dans le tableau ci-dessous, quelques valeurs du PCI des composants du gaz combustible.

Tableau IV.5. PCI des composants du gaz de combustion.

Constituants	Formule chimique	PCI (kcal /Nm^3)
Méthane	CH_4	8554,46
Ethane	C_2H_6	15323,66
Propane	C_3H_8	21795,98
Butène	C_4H_8	27120,98
Iso butane	iC_4H_{10}	28294,64
n - butane	nC_4H_{10}	28268,30
iso pentane	iC_5H_{12}	34893,30
n - pentane	nC_5H_{12}	34776,79
Dioxyde de carbone	CO_2	0
Azote	N_2	0
Mélange	10760	

- Les deux isomères du pentane ont le pouvoir calorifique inférieur le plus élevé avec des valeurs qui dépassent 34700 kcal/Nm^3. Pour le gaz combustible, son PCI est de 10760 kcal/Nm^3 qui est supérieur à celui du méthane mais inférieur à ceux des autres composés hydrocarbonés.

IV.2.4. Quantité de chaleur fournie par la combustion ($Q_{fournie}$)

Les résultats de la quantité de chaleur fournie par la combustion dans les deux cas étudiés : avec et sans préchauffeur sont résumés dans le tableau IV.6 et illustrés sur la figure IV.1.

Tableau IV.6. Chaleur fournie par la combustion.

Fours	Q fournie (kcal/h)	
	Avec préchauffeur d'air	Sans préchauffeur d'air
100-F-101	25630320	29460880
100-F-102	15655800	19012920
100-F-103	15548200	17807800

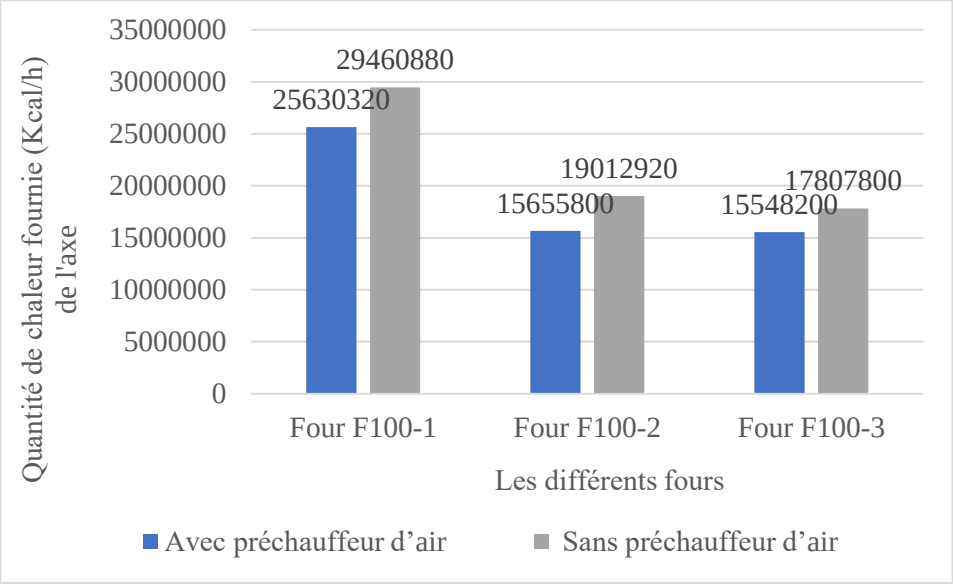


Figure IV.1. Quantité de chaleur fournie par les trois fours avec et sans APH.

- D'après les données du tableau IV.6 et la lecture de la figure IV.1, nous concluons que la quantité de chaleur fournie par la combustion pour le cas sans APH est plus grande par rapport de celle en présence de l'APH, ce qui indique que l'emploi de la technologie APH ne requiert pas beaucoup de chaleur pour la combustion ce qui conduit à un gain considérable d'énergie.

IV.2.5. Composition des fumées

A) Composition théorique des fumées

Les valeurs calculées de la composition théorique des fumées dans chaque constituant du gaz combustible ainsi que leurs quantités totales sont rassemblées respectivement dans les tableaux IV.7 et IV.8.

Tableau IV.7. Les valeurs théoriques de la composition des fumées.

Constituants	% Vol.	VO_2	VCO_2	VH_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	249,76	134,62	230,28

Tableau IV.8. Les quantités des constituants des fumées.

Constituants	V (Nm^3)	% Vol.
CO_2	134,79	8,55
H_2O	248,65	15,76
O_2	249,76	15,85
N_2	943,07	59,83
Total	1576,28	100

- D'après les résultats obtenus des quantités théoriques des constituants des fumées, nous remarquons que la quantité d'eau produite (248,65 Nm^3) est quasiment égale à la quantité d'oxygène nécessaire à la combustion (249,76 Nm^3). Concernant la quantité théorique du dioxyde de carbone (134,79 Nm^3), elle est estimée à 54% de la quantité de vapeur d'eau.

B) Composition réelle des fumées

Les compositions réelles des fumées avec et sans préchauffeur dans les trois fours (100-F-101, 100-F-102 et 100-F-103) sont présentées dans les tableaux ci-dessous :

Tableau IV.9. La composition réelle des fumées dans le Four 100-F-101.

Constituants	Avec APH		Sans APH	
	V (Nm^3)	% Vol.	V (Nm^3)	% Vol.
CO_2	134,79	9,90	134,79	9,88
H_2O	249,194	18,30	249,214	18,28
O_2	7,268	0,533	7,542	0,55
N_2	970,397	71,27	971,427	71,27
Total	1361,649	100	1362,973	100

Tableau IV.10. La composition réelle des fumées dans le Four 100-F-102.

Constituants	Avec APH		Sans APH	
	V (Nm^3)	% Vol.	V (Nm^3)	% Vol.
CO_2	134,79	9,90	134,79	9,88
H_2O	249,189	18,31	249,214	18,28
O_2	7,193	0,528	7,542	0,55
N_2	970,115	71,26	971,427	71,427
Total	1361,287	100	1362,973	100

Tableau IV.11. La composition réelle des fumées dans le Four 100-F-103.

Constituants	Avec APH		Sans APH	
	V (Nm^3)	% Vol.	V (Nm^3)	% Vol.
CO_2	134,79	9,916	134,79	9,739
H_2O	249,157	18,33	258,6247	18,687
O_2	6,768	0,4979	9,965	0,720
N_2	968,517	71,254	980,5384	70,8508
Total	1359,232	100	1383,918	100

- Les résultats montrent que la quantité utilisée de l'oxygène dans les trois fours a nettement diminué (< 10 Nm^3) en comparant avec la valeur théorique nécessaire dans chaque four (249,76 Nm^3).
- L'installation d'un préchauffeur dans les trois types de four a une influence sur la quantité de l'oxygène utilisée.
- La quantité totale des fumées dans le cas de l'utilisation du préchauffeur est inférieure à celle obtenue dans le cas sans préchauffeur, cette constatation a été faite notamment pour le four 100-F-103 qui fonctionne comme rebouilleur de la colonne de distillation atmosphérique (1359,23 Nm^3 avec APH et 1383,91 Nm^3 sans APH).

IV.2.6. Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{fumées}$)

A) Débits molaires des fumées

Les valeurs des débits molaires calculées des fumées sont notées dans le tableau suivant :

Tableau IV.12. Les débits molaires des fumées.

Débits (kmol/h)	Four 100-F-101	Four 100-F-102	Four 100-F-103
Avec APH	1447,967	884,228	876,826
Sans APH	1786,162	1075,166	1022,492

- Il est bien clair dans ces données, que les débits molaires des fumées dans les trois fours en présence des préchauffeurs sont inférieurs à ceux des fumées résultant de la réaction de combustion qui se produit dans les mêmes fours fonctionnant sans préchauffeurs.

B) Chaleur perdue par les fumées dans les trois fours, avec préchauffeur d'air

Les quantités de chaleur perdue par les fumées des Fours F101, F102 et F103 muni chacun d'un préchauffeur d'air (APH) sont récapitulées respectivement dans les tableaux IV.13, IV.14 et IV.15.

Tableau IV.13. Chaleur perdue par les fumées du Four F101 avec APH.

Four 100-F-101			
Chaleur spécifique moyenne des fumées (Cp_{moy})			
Constituants	**Cp_i (kcal/kmole.°C)**	**y_i**	**Cpi.yi/100**
CO_2	9,5396	9,90	0,944420
H_2O	8,0993	18,30	1,482217
O_2	6,9931	0,533	0,037273
N_2	7,1316	71,27	5,082691
Cp_{moy}(kcal/kmole.°C)			7,547055
Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{fumées}$)			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			177°C
Débit de gaz combustible (Nm^3/h)			2382
Débit des fumées (kmol/h)			1447,967
$Q_{fumées}$ (kcal/h)			1934238

Tableau IV.14. Chaleur perdue par les fumées du Four F102 avec APH.

Four 100-F-102			
Chaleur spécifique moyenne des fumées (Cp_{moy})			
Constituants	**Cp_i (kcal/kmole.°C)**	**y_i**	**Cpi.yi/100**
CO_2	9,5396	9,90	0,944420
H_2O	8,0993	18,31	1,482981
O_2	6,9931	0,528	0,036923
N_2	7,1316	71,26	5,081978
Cp_{moy}(kcal/kmole.°C)			7,544870
Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{fumées}$)			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			177°C
Débit de gaz combustible (Nm^3/h)			1455
Débit des fumées (kmol/h)			884,228
$Q_{fumées}$ (kcal/h)			1180835

Tableau IV.15. Chaleur perdue par les fumées du Four F103 avec APH.

Four 100-F-103			
Chaleur spécifique moyenne des fumées (Cp_{moy})			
Constituants	**Cp_i (kcal/kmole.°C)**	**y_i**	**Cpi.yi/100**
CO_2	9,5396	9,916	0,945946
H_2O	8,0993	18,33	1,484601
O_2	6,9931	0,4979	0,034818
N_2	7,1316	71,254	5,081550
Cp_{moy}(kcal/kmole.°C)			7,546915
Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{fumées}$)			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			177°C
Débit de gaz combustible (Nm^3/h)			1445
Débit des fumées (kmolh)			876,826
$Q_{fumées}$ (kcal/h)			1171267

- On observe que dans ce cas où les fours sont accompagnés par des préchauffeurs d'air, la quantité de chaleur perdue par les fumées dans le premier four fonctionnant entant que rebouilleur de la colonne de préfractionnement (1934238 kcal/h) est supérieure à celle perdue par les fumées des deux autres fours (1180835 kcal/h pour F102 et 1171267 kcal/h pour F103).
- Sachant que la température de sortie des fumées est la même pour les trois fours (117°C), le débit considérable du gaz combustible (2382 Nm^3) dans le four F101 est un facteur important pour produire une plus grande chaleur par rapport aux fours F102 et F103.

C) Quantités de chaleur perdue par les fumées dans les trois fours, sans préchauffeur d'air

Les quantités de chaleur perdue par les fumées des fours F101, F102 et F103 sans préchauffeur d'air sont données respectivement dans les tableaux IV.16, IV.17 et IV.18. Le tableau IV.19 et la figure IV.2 rassemblent les résultats de la chaleur fournie dans les deux cas étudiés avec et sans préchauffeurs d'air.

Tableau IV.16. Chaleur perdue par les fumées du Four F101 sans APH.

Four 100-F-101			
Chaleur spécifique moyenne des fumées (Cp_{moy})			
Constituants	**Cp_i (kcal/kmole.°C)**	**y_i**	**Cpi.yi/100**
CO_2	10,4515	9,88	1,032608
H_2O	8,3591	18,28	1,528043
O_2	7,3961	0,55	0,040678
N_2	7,0988	71,27	5,059314
Cp_{moy}(kcal/kmole.°C)			7,660643
Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{fumées}$)			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			414,72°C
Débit de gaz combustible (Nm^3/h)			2738
Débit des fumées (kmol/h)			1786,162
$Q_{fumées}$ (kcal/h)			5674675

Tableau IV.17. Cchaleur perdue par les fumées du Four F102 sans APH.

Four 100-F-102			
Chaleur spécifique moyenne des fumées (Cp_{moy})			
Constituants	**Cp_i (kcal/kmole.°C)**	**y_i**	**Cpi.yi/100**
CO_2	10,5089	9,88	1,038279
H_2O	8,3804	18,28	1,531937
O_2	7,4112	0,88	0,065218
N_2	7,1086	71,427	5,077459
Cp_{moy}(kcal/kmole.°C)			7,718937
Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{fumées}$)			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			431,13°C
Débit de gaz combustible (Nm^3/h)			1767
Débit des fumées (kmol/h)			1075,166
$Q_{fumées}$ (kcal/h)			3578007

Tableau IV.18. Chaleur perdue par les fumées du Four F103 sans APH.

Four 100-F-103			
Chaleur spécifique moyenne des fumées (Cp_{moy})			
Constituants	**Cp_i (kcal/kmole.°C)**	**y_i**	**Cpi.yi/100**
CO_2	10,4634	9,739	1,019030
H_2O	8,3019	18,687	1,551319
O_2	7,3419	0,720	0,052861
N_2	7,0741	70,8508	5,012056
Cp_{moy}(kcal/kmole.°C)			7,635266
Quantité de chaleur perdue par les fumées ($Q_{fumées}$)			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			368,28°C
Débit de gaz combustible (Nm^3/h)			1655
Débit des fumées (kmol/h)			1022,492
$Q_{fumées}$ (kcal/h)			2875161

- D'après les valeurs dans les tableaux précédents, on remarque que la quantité de chaleur perdue par les fumées dans le premier four était également supérieure à celle perdue par les fumées des deux autres fours.

Tableau IV.19. Tableau récapitulatif des chaleurs perdues par les fumées.

Fours	**$Q_{fumées}$ (kcal/h)**	
	Avec préchauffeur d'air	**Sans préchauffeur d'air**
100-F-101	1934238	5674675
100-F-102	1180835	3578007
100-F-103	1171267	2875161

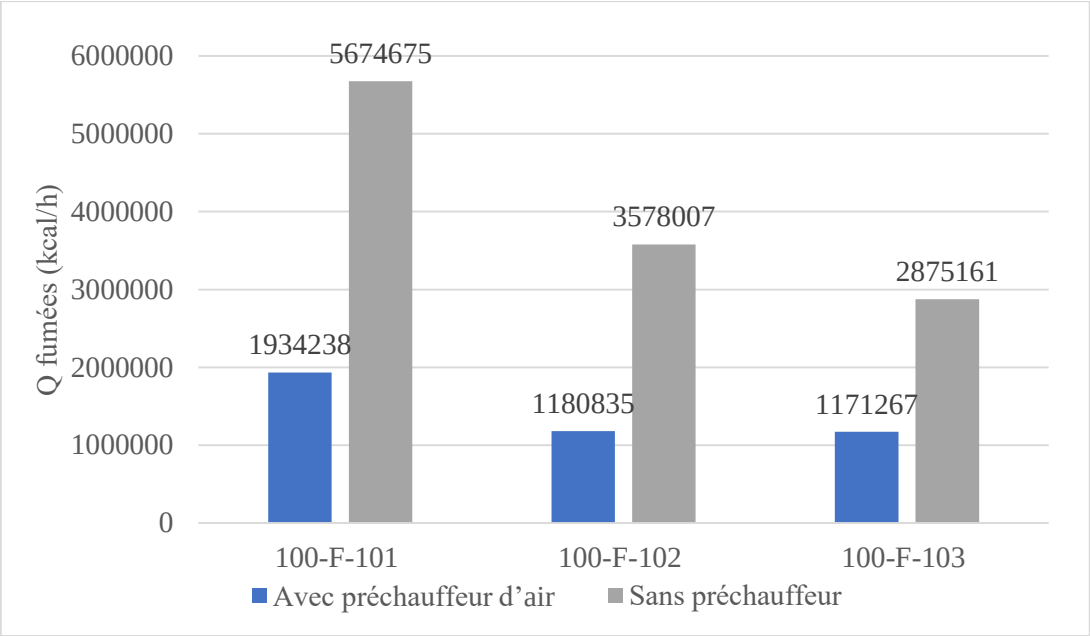


Figure IV.2. Quantité de chaleur perdue par les fumées avec et sans APH dans les trois fours.

- Selon les résultats donnés dans le tableau récapitulatif et qui sont illustrées sous forme de graphique, nous déduisons que l'appareil APH réduit la quantité de chaleur perdue par les fumées, ce qui démontre que la technologie APH préserve la chaleur produite par la combustion.

IV.2.7. Quantité de chaleur perdue par les parois

La quantité de chaleur perdue par les parois peut être estimée à 2% de la quantité de chaleur libérée par la combustion.

Les valeurs calculées de la quantité de chaleur perdue par les parois des trois fours avec et sans APH sont reportées dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.20. Chaleur perdue par les parois avec et sans APH.

Fours	**Q_{parois} (kcal/h)**	
	Avec préchauffeur d'air	**Sans préchauffeur d'air**
100-F-101	512606	589217
100-F-102	313116	380258
100-F-103	310964	356156

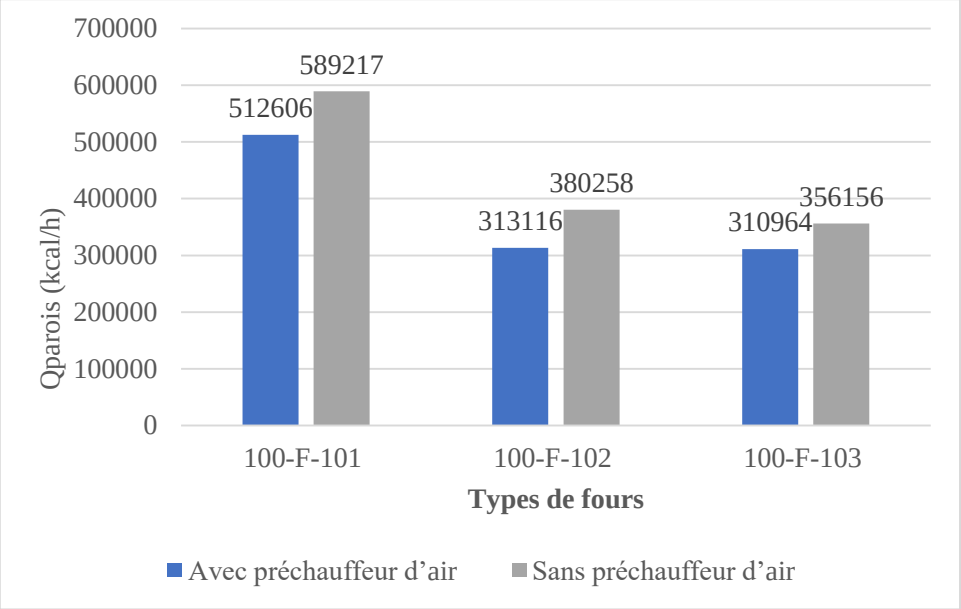


Figure IV.3. Quantité de chaleur perdue par les parois dans les trois fours avec et sans APH.

- D'après le tableau IV.20 et la figure IV.3, on constate que la chaleur perdue dans les parois dans le four F101 est plus grande que celle dans les fours F102 et F103.
- Les valeurs de la chaleur perdue par les parois dans chaque four sont proche dans les deux cas avec et sans préchauffeur.

IV.2.8. Rendement thermique des fours

Les valeurs du rendement thermique de chaque four, calculées avec et sans préchauffeur d'air sont reportées dans le tableau IV.21 et illustrées sur la figure IV.4.

Tableau IV.21. Les valeurs du rendement thermique de chaque four.

Fours	**Rendement thermique (%)**	
	Avec préchauffeur d'air	**Sans préchauffeur d'air**
100-F-101	90,45	78,34
100-F-102	90,46	79,18
100-F-103	90,47	81,85

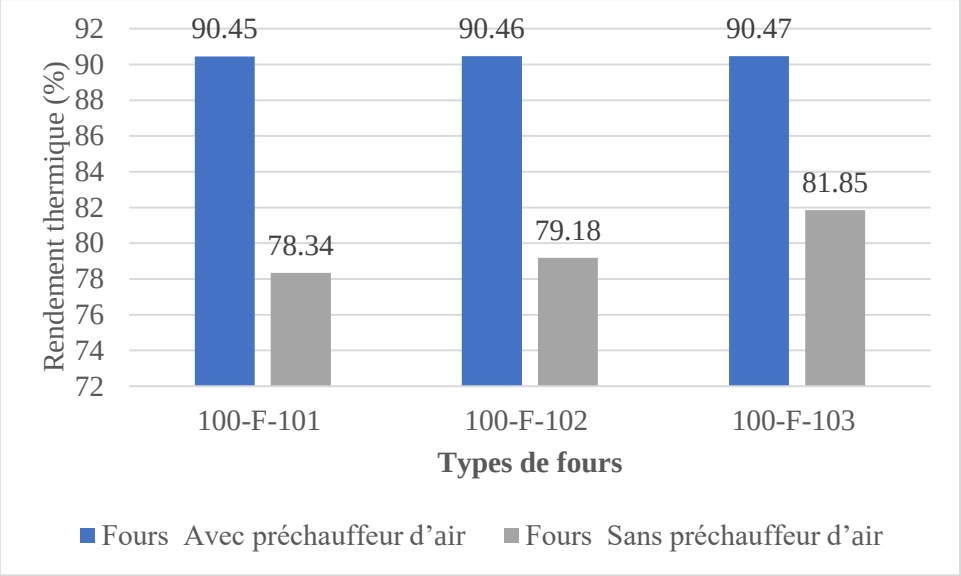


Figure IV.4. Les rendements thermiques des fours.

- D'après les résultats figurant dans le tableau et l'illustration ci-dessus, nous remarquons que les rendements thermiques en absence de l'APH dans les trois fours n'ont pas dépassé 82%, par contre, avec L'APH, elles ont atteints un pourcentage de plus de 90%.
- Nous pouvons conclure que le préchauffeur d'air améliore le rendement thermique des fours avec un pourcentage de plus de 10%, réduisant ainsi la quantité de chaleur perdue.

IV.3. Etude technicoéconomique

IV.3.1. Energie récupérée

D'après les résultats de calcul, la différence entre la consommation du combustible (ΔNv) avec et sans préchauffeur d'air est :

A) les trois fours fonctionnant avec APH

N_{va}=2382+1455+1445 N_{va}=5282

B) les trois fours fonctionnant sans APH

N_{vs} =2738+1767+1655 N_{vs} =6160

A partir de l'équation (III.38) nous calculons ΔN_v :

ΔV_v = 878 Nm3/h

Alors nous calculons ΔV_v pour un an :

$\Delta V_v = 878 \times 24 \times 365$ ΔV_v =7691280 Nm^3/an

D'après l'équation (III.39) la quantité d'énergie récupérée est comme suit :

$Q_{récupérée} = 7691280 \times 10760$ $Q_{récupérée}$ = 82758172800 kcal/an

IV.3.2. Calcul du gain d'argent

En connaissant le prix actuel du gaz naturel P = 15,72 DA/Nm^3

G = 7691280 ×15,72 G =120906921,6 DA/an.

Donc le gain d'argent durant un an est égal à 120906921,6 DA/an.

Dans notre système APH, nous utilisons deux ventilateurs de tirage, A et B, alimentés par de l'énergie électrique. Nous avons évalué le gain énergétique généré par leur fonctionnement. Chaque ventilateur consomme en moyenne environ 250 kWh par mois.

Nous prenons le prix d'un kilowatt à cette valeur : 1KW 189,46 DA

Donc le prix de la puissance absorbée par un ventilateur = 250 x 136,62= 47365 DA

Durant une année, elle coutera = 34155× 12=568380 DA

Pourque l'APH fonctionne, les deux ventilateurs doivent travailler ensemble, donc nous allons calculer le prix pour les deux ventilateurs comme suit :

Le prix de la puissance absorbée par les deux ventilateurs 409860 x 2 =1136760 DA

Le gain d'argent réel = 120906921,6 -1136760 = 119770661,6DA.

Conclusion

D'après les résultats des calculs et les données obtenues, nous constatons que les rendements des trois fours utilisant la technologie APH sont significativement supérieurs à ceux des mêmes fours sans cette technologie. En effet, les rendements avec APH sont de 90,45 % pour le four F101, 90,46 % pour le four F102, et 90,47 % pour le four F103, tandis que sans APH, ils s'élèvent respectivement à 78,34 %, 79,18% et 81,85 %.

Il convient également de souligner que la quantité d'énergie récupérée grâce à la technologie APH utilisée dans les trois fours, estimée à $8{,}2758172800 \times 10^{10}$ kcal/an, a permis à l'usine d'économiser environ 7691280 Nm^3 de gaz naturel par an. Ce chiffre est particulièrement significatif, d'autant plus que le coût annuel correspondant est évalué à 119770661,6 DA.

Conclusion générale

Conclusion générale

La technologie de préchauffeur d'air L'APH a été introduite dans les raffineries pour son caractère environnemental et économique.

Ce travail avait comme objectifs :

- Le calcul des rendements thermiques des trois fours F-101, F-102 et F-103 de la raffinerie RA2K avec et sans préchauffeurs d'air.
- L'estimation du gain d'énergie obtenu par le fonctionnement des fours en utilisant un préchauffeur d'air de combustion.

A la fin de cette étude, nous pouvons tirer les points suivants :

- Grace à la mise en place d'un système de réchauffement de l'air de combustion par les gaz chauds émanant de la zone de convection, fonctionnant avec un excès d'air, produisant ainsi une très faible émission de gaz polluants, on a obtenu une notable amélioration du rendement thermique des fours modernes, atteignant jusqu'à 90%.
- Une réduction significative de la température moyenne des fumées, passant de 390 °C à 177°C.
- Une diminution notable des émissions de gaz à effet de serre liées à la combustion.
- Une amélioration moyenne du rendement des trois fours d'environ 11%.
- Une économie de gaz combustible estimée à 7691280 Nm^3/an.
- Un gain financier évalué à près de 119770661,6 millions de dinars algériens par an.

Ce travail peut être complété par des études ultérieures sur d'autres appareils en l'occurrence les déshumidificateurs d'air afin d'améliorer le rendement thermique des fours et les protéger de la détérioration causée par la vapeur d'eau.

Références

[1] Boudjadi Mohamed Amir : « Etude du rendement thermique des fours avec et sans la mise en service du préchauffeur d'air (Raffinage de condensat RA2K) », 2017.

[2] J.Le Noguès, « Etude des fours pétroliers et pétrochimiques», Editions Technip, paris », 1974.

[3] Trambouze, P, « Le Raffinage du pétrole -Tome 4-Matériels et équipements », Editions Technip, 1999.

[4] Mullinger, Peter et Jenkins, « Barrie. Industrial and Process. 2nd. Oxford Elsevier's Science&Technology», 2014.

[5] M. A. Masri, « Les fours dans l'industrie pétrolière (document Institut Algérien du Pétrole Boumerdes) », 2013.

[6] Soudani Ala Eddine, Beghour Yassine : « Calcul des rendements thermiques des fours tubulaires avec et sans APH et du gain d'énergie (Raffinerie de condensat RA2K) », Université de Guelma, 2020.

[7] http://www.azprocede.fr/Cours_GC/combustion_fours.html.

[8] http : m.fr.vrcoolerru.com. Préchauffeur d'air et sans application dans les fours de chauffage

[9] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Combustion

[10] https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/fluides-et-combustion-42213210/energetique-de-la-combustion-be8311/definitions-et-mecanismes-de-la-combustion-be8311niv10001.html.

[11] Maurice Demoulin. «Traité pratique de la machine locomotive», PARIS, LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, BAUDRY ET C, EDITEUR.1898.

[12] Document 3938.combustion-STI2d.

[13] Benramoul Abderrahman : « 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, 2021.

[14] Cours combustion chapitre 1

[15] https://www.ansys.com/fr-fr/simulation-topics/what-is-combustion. 25\04\2025 ; 14.25

[16] G. Monnot- la combustion dans les fours et les chaudières. Edition TECHNIP, 1978.

[17] Joseph Martin et Pierre Wauters. éléments de thermodynamique technique.ucl presses universitaires de louvain, 2014.

[18] Perthuis, E, Combustion industrielle... Editions OPHRYS, 1983.

[19] Claude Vallée, Gilbert Bilodeau, Cégep Joliette-De Lanaudière : « Les techniques de culture en multicellules »,1999.

[20] Mémoire Descriptif du Complexe RA2K, Sonatrach.

[21] Yaghla Mouhamed Amine : « Etude de fiabilité et analyse des risques de défaillances des pompes centrifuges PM113A, B et C du complexe Topping de condensat (RA2K) de Skikda, 2020.

[22] Description de l'unité 100 (document fourni par Sonatrach).

[23] Description de l'unité 200 (document fourni par Sonatrach).

[24] Description de l'unité 300 (document fourni par Sonatrach).

[25] Description de l'unité 400 et 500 (document fourni par Sonatrach).

Annexes

Tableau A.1: Chaleur spécifique moyenne des fumées

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_2O_V	CO_2
100	6,92	6,97	7,05	6,97	8,03	9,17
200	6,95	7,00	7,15	7,00	8,12	9,65
300	6,97	7,04	7,26	7,06	8,22	10,06
400	6,98	7,09	7,38	7,12	8,34	10,40
500	6,99	7,15	7,49	7,19	8,47	10,75
600	7,01	7,21	7,59	7,27	8,60	11,03
700	7,03	7,27	7,68	7,34	8,74	11,28
800	7,06	7,35	7,77	7,43	8,89	11,50
900	7,09	7,42	7,85	7,50	9,04	11,70
1 000	7,12	7,49	7,92	7,57	9,18	11,88
1 100	7,15	7,56	7,98	7,64	9,32	12,05
1 200	7,20	7,62	8,04	7,70	9,45	12,19
1 300	7,24	7,67	8,11	7,76	9,58	12,32
1 400	7,28	7,73	8,16	7,81	9,72	12,45
1 500	7,32	7,78	8,20	7,85	9,84	12,56
1 600	7,36	7,82	8,24	7,90	9,96	12,66
1 700	7,40	7,86	8,28	7,94	10,09	12,75
1 800	7,45	7,91	8,33	7,98	10,20	12,84
1 900	7,49	7,94	8,38	8,02	10,30	12,92
2 000	7,53	7,98	8,42	8,05	10,41	12,99
2 100	7,57	8,01	8,45	8,09	10,52	13,06
2 200	7,62	8,05	8,48	8,12	10,61	13,13
2 300	7,66	8,08	8,52	8,15	10,71	13,19
2 400	7,70	8,10	8,56	8,18	10,79	13,24
2 500	7,74	8,14	8,59	8,21	10,87	13,30

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

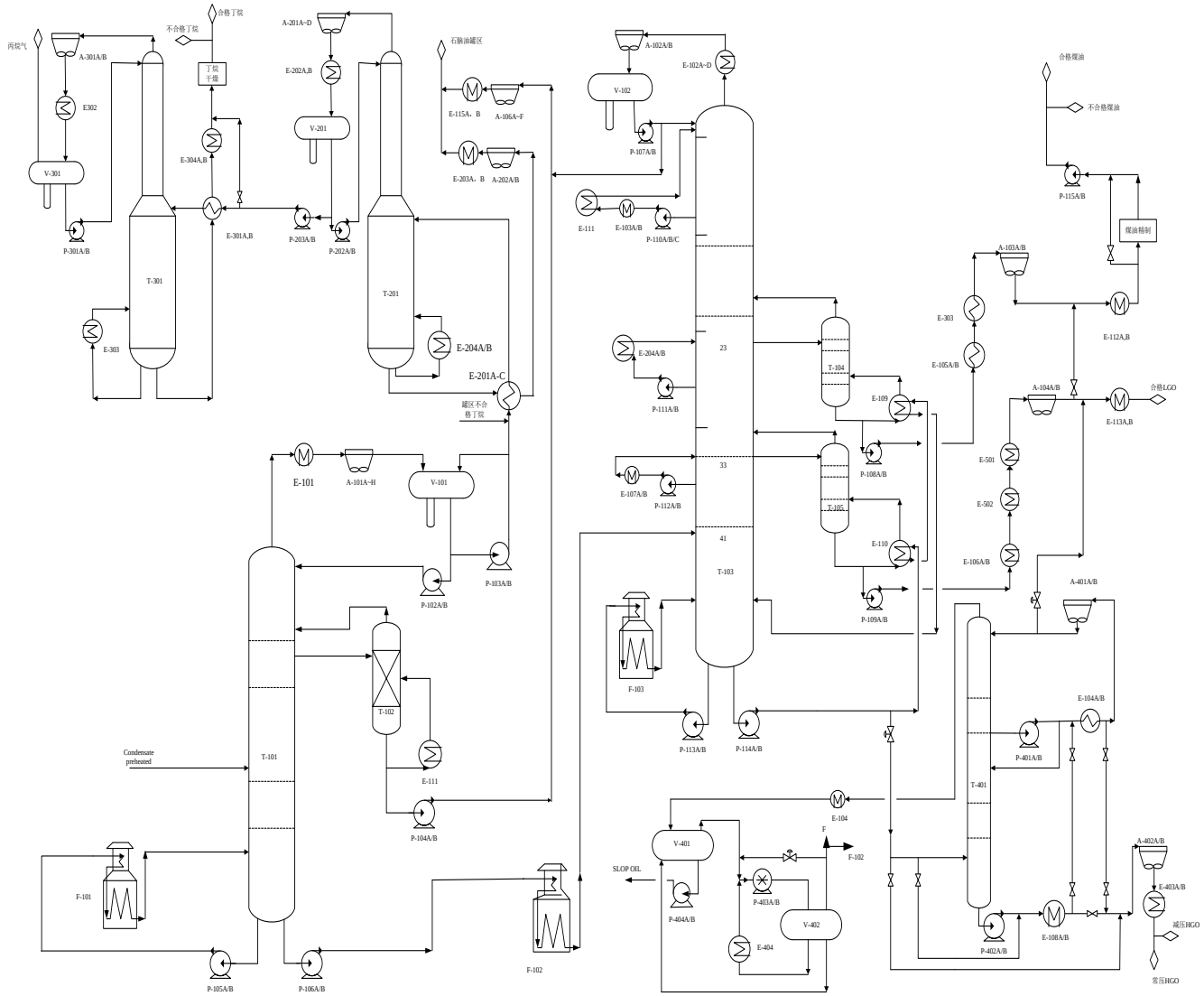



Figure 1 :Schéma de l'unité 100