

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE d'ADRAR

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DES  
HYDROCARBURES ET ENERGIES RENOUVELABLES



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE  
L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN  
GENIE CHIMIQUE**

**Thème**

**Étude théorique de la consommation du fuel gaz au niveau du  
four F202- 201 de l'unité du reformage catalytique de la raffinerie  
d'Adrar RA1D**

**Présenté par :**

Mr Belkacemi Elamine

Mr younsi Ahmed

**Members de jury:**

President : Mr.Moulay Ali Ali

M.A.A

Univ. Adrar

Encadreur : Mr. Debbaghi Slimane

M.C.B

Univ. Adrar

Examineur : Mr.sakemeche Mounir

M.C.B

Univ. Adrar

**Année Universitaire : 2020 / 2021**



## شهادة الترخيص بالإيداع

أدباً عن سيدي

أنا الأستاذ(ة):

المشرف مذكرة الماستر.

الموسومة بـ : *étude théorique de la consommation du fuel gaz au niveau de four F 202-201 de l'unité réformatrice catalytique de la raffinerie d'Adrar*

من إنجاز الطالب(ة): *يلقاسي الأمان*

و الطالب(ة): *يلقاسي أحمد*

كلية : *العلوم والتكنولوجيا*

القسم : *المحروقات والطاقات المتجددة*

التخصص : *هندسة كيميائية*

تاريخ تقييم / مناقشة:

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين

النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها.

وبإمكانهم إيداع النسخ الورقية (02) والأليكترونية (PDF).

- امضاء المشرف:

3 1 جويلية 2021

ادرار في :



مساعد رئيس القسم:

*و. خليف عمير*

رئيس قسم المحروقات والطاقات المتجددة

بكلية العلوم والتكنولوجيا

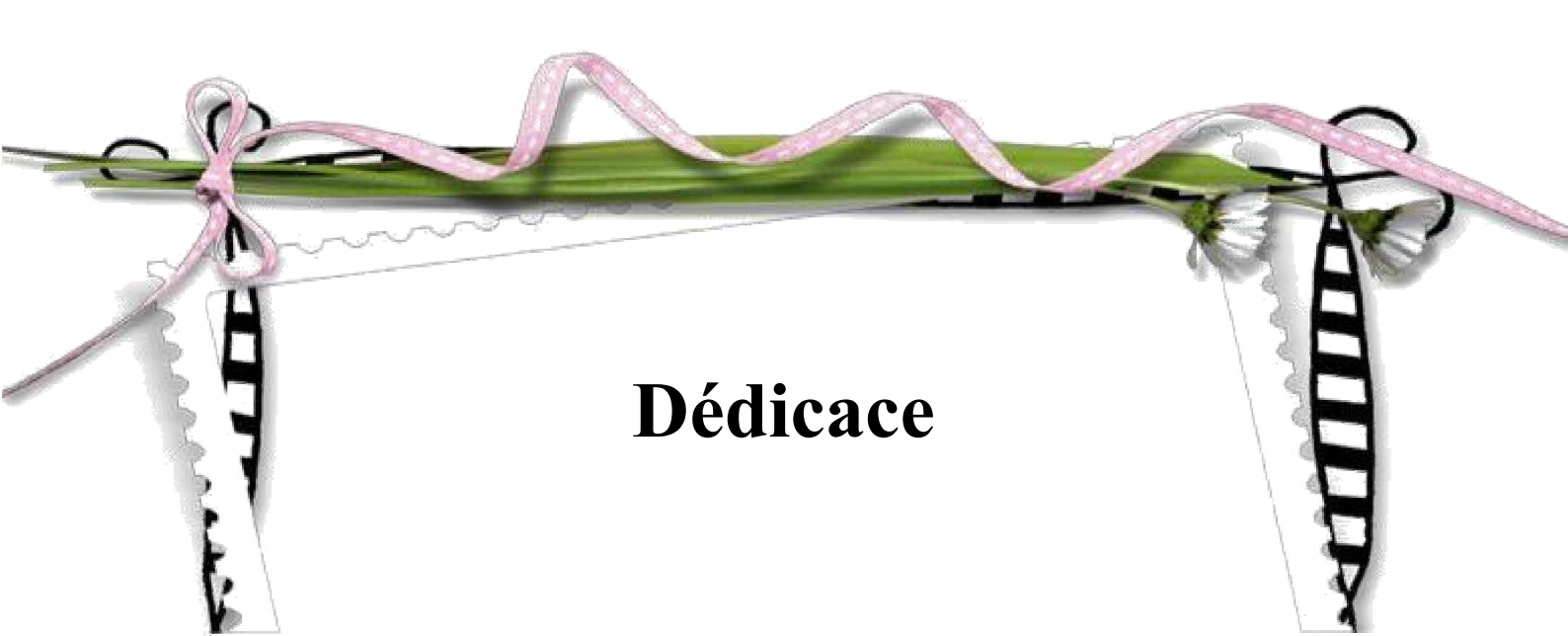
## Remerciements

*« Louange à Allah qui nous a guidés à ceci. Nous n'aurions pas été guidés, si Allah ne nous avait pas guidés »*

**[ Sourate 7. Al Araf verset 43 ]**

Ma reconnaissance, et mes sincères remerciements vont à mon encadreur Monsieur Slimane Debbaghi pour m'avoir dirigé tout au long de la réalisation de ce travail. Ses orientations, ses encouragements, sa compréhension, sa disponibilité constante m'ont été d'une précieuse aide.

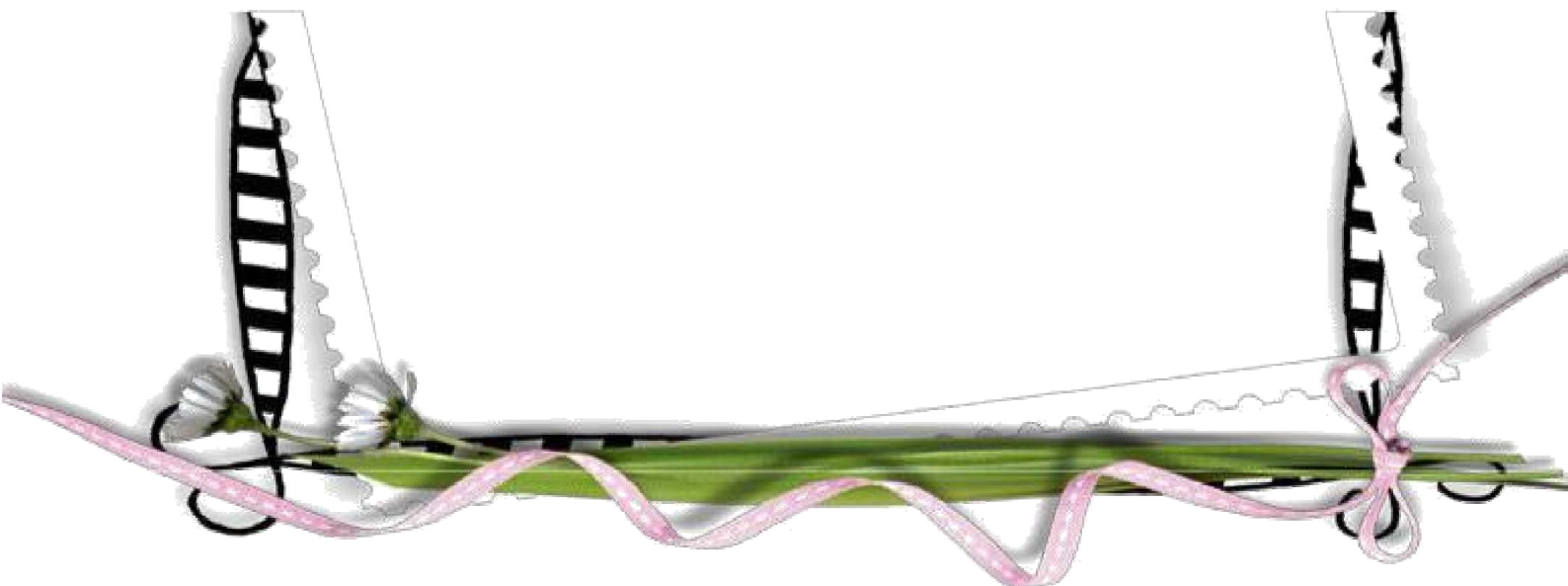
Je tiens à remercier également tous mes enseignants pour leurs bonnes orientations et pour leur aide précieuse. Je tiens à remercier également tous mes collègues de département de Hydrocarbures et Energies Renouvelables de l'université d'ADRAR.



## Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma mère et mon père,  
mes frères, mes sœurs et  
toute ma famille, Mes  
collègues et mes amis.



# Résumé

---

Le chauffage est considéré comme une étape de base dans le processus de reformage catalytique. Cette étape se produit au niveau des fours industriels. Dans le présent travail, l'efficacité d'un des fours industriels de l'unité de reformage catalytique de la raffinerie d'Adrar a été étudiée. En vérifiant le fonctionnement du four, en plus de proposer des solutions pour améliorer les performances.

**Mots clés :** four industriel, raffinerie, reformage catalytique

فُ هذا . تحدث هذه الخطوة علي مستوى الأفران الصناعيّة . عتبر التسخه خطوة أساسيّة فُ عملت الإصالح التحفّشّ مه خالل فحص عمل الفرن . العمل تم دراسة كفاءة أحد الأفران الصناعيّة لوحدة التتفّ التحفّشّ فُ مصفاة أدرار . واقتراح حلول لتحسّه الأداء .

الأفران الصناعيّة ، المصفاة ، التحسّه الحفاس :الكلمات المفتاحية

Heating is considered a basic step in the catalytic reforming process. This step occurs at the level of industrial furnaces. In the present work, the efficiency of one of the industrial furnaces of the catalytic reforming unit of the Adrar refinery was studied. by checking the operation of the oven, in addition to proposing solutions to improve performance.

**Keywords:** industrial furnace, refinery, catalytic reforming

## Sommaire

<b>Lister e des tableaux</b> .....	<b>I</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>II</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>III</b>
<b>Chapitre I: Etude Bibliographique</b> .....	<b>10</b>
I-1 Introduction.....	10
I-2 Description des fours industriels .....	10
I-3 Généralité sur Les Fours Dans l'Industrie Pétrolière.....	10
I-4 Domain d'utilisation des fours tubulaires.....	10
I-4.1 Réchauffage d'un fluid sans changement de phase.....	10
I-4.2 Réchauffage d'un fluid avec vaporisation simple .....	10
I-4.3 Réchauffage d'un fluide avec réaction chimique .....	10
I-5 Classification des fours.....	10
I-5.1 Fours continus et fours discontinus.....	10
I-5.2 Chauffage direct et chauffage indirect .....	12
I-5.2.1 Fours à chauffage direct.....	12
I-5.2.2 Fours à chauffage indirect .....	12
I-5.3 Fours à haute et fours à basse temperature .....	14
I-5.4 Combustibles .....	14
I-6 Constitution d'un four .....	01
I-7 Les différents types de fours .....	00
I-7.1 Les fours cylindriques verticaux.....	00
I-7.2 Les fours dits (boîtes) à tubes verticaux .....	00
I-7.3 Les fours dits (cabines) à tubes horizontaux .....	00
I-7.4 Les fours à chauffage par murs radiants .....	00
I-7.5 Les fours à double chauffe .....	00
I-7.6 Le choix d'un type de four dépend principalement des facteurs suivants .....	00
I-8 Rendement d'un four .....	00
I-9 La combustion dans un four .....	00
I-9.1 Généralités .....	00
I-9.2 Définition de la chaleur de combustion .....	00
I-9.3 Réactions de combustion .....	00
I-9.4 Composition théorique des fumes .....	01
I-9.4.1 Teneur théorique en produits agressifs .....	02
I-9.4.2 Pouvoir calorifique supérieur et inférieur.....	02
I-10 Rôle de l'atmosphèreet de la pression dans les fours .....	03
I-10.1 Contrôle de la pression dans les fours .....	03
I-10.2 Circulation des fumées .....	03
I-10.3 Entrées d'air .....	01
I-10.4 Interaction entre l'atmosphèreet les produits à chauffer .....	01
I-11 Isolation des fours .....	01
I-11.1 Conception générale .....	01
I-11.2 Définitions .....	00

# Sommaire

---

I-11.3 Physique des matériaux réfractaires .....	00
I-11.4 Chimie des matériaux réfractaires .....	00
I-11.5 Interactions entre les réfractaires et le four .....	00
I-11.6 Dimensionnement des parois réfractaires .....	00
I-12 Brûleurs de fours industriels .....	00
I-12.1 Importances du brûleur .....	00
I-12.2 Brûleurs à pré-mélange .....	00
I-12.3 Brûleur à flamme de diffusion .....	00
I-13 Avantages et inconvénients des fours industriels .....	00
I-14 <i>Conclusion</i> .....	00
<b>Chapitre II: Raffinage de pétrole .....</b>	<b>62</b>
II-1 Introduction .....	01
II-2 Les opérations et les procédés de raffinage de base .....	01
II-3 Les unités de production .....	03
II -3.1 Unité de distillation atmosphérique.....	04
II -3.2 Unité de craquage catalytique .....	04
II -3.3 Unité de reformage catalytique.....	04
II -3.3.1 Principe.....	04
II -3.3.2 Principales réactions et caractéristiques physicochimiques .....	01
II -3.3.2 .1 Nature des réactions mises en jeux .....	01
II-3.3.2.2 Principales réaction d'hydrotraitement.....	00
II-3.3.2.3 Thermodynamique et cinétique des réactions.....	00
II -3.3.2.4 Propriétés du catalyseur de reformage .....	01
II.3.3.3 Spécifications des performances de reformage catalytiques .....	03
II.3.3.4 Bilans massiques.....	01
II.3.3.4.1 Bilan massique de l'unité reforming.....	01
II.3.3.4.2 Bilan de masse de la section préfractionnement.....	01
II.3.3.4.3 Bilan massique de la section prétraitement et la section reforming .....	00
II 3.3.5 Produits issus de l'unité de reformage catalytique .....	00
II 4 Conclusion.....	00
<b>Chapitre III Vérification et calcul d'endement du four F202-201 de l'unité reforming</b>	
III-1 Problématique .....	00
III-2 Conception .....	00
III-3 Caractéristiques du Four F202-201 .....	00
III-4 Rendement du Four F202-201 .....	00
III-5 Calculs effectués .....	00
III-5.1 Calcul de la combustion .....	01
III-5.2 Réactions de combustion .....	01
III-5.3 Quantité d'Oxygène nécessaire .....	01
III-5.4 La quantité d'air nécessaire à la combustion .....	02
III-5.5 La quantité pratique de l'air en tenant compte de l'excès d'air .....	02
III-5.6 Composition des fumés (quantité des produits de la combustion) .....	02
III-6 Caractéristique des fumées .....	03
III-7 Tableau de composition des fumées .....	04

## Sommaire

---

III-8 Calcul des spécifications des fumées et de gaz combustible .....	01
III-9 Calcul de vérification de rendement du four F202-201 .....	00
III-9.1 Calcul de l'enthalpie des fumées .....	00
III-9.2 Calcul du rendement actuel .....	00
III-10 Comparaison des données et de résultats entre le Four F202-201 (la raffinerie d'Adrar) et le Four H101 (Hassi R'mel) .....	00
III-11 Recommandation .....	59
III-11.1 Réduction des pertes aux parois.....	60
III-11.2 Réduction des pertes des fumées.....	60
III-11.2-1 Réduction l'excès d'air.....	60
III-11.2-2 Abaisant la température des fumées.....	60
III-11.2-3 Amélioration du PCI du gaz combustible.....	61
III-12 Conclusion .....	62
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>26</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	<b>26</b>



## Lister e des tableaux

---

### Lister e des tableaux :

Tableaux	Titre	Pages
Tableau I-1	principales réactions de combustion	16
Tableau I-2	Valeurs spécifiques de produit agressif	17
Tableau II-1	principale spécifications du pétrole brut traité	30
Tableau II-2	principales réactions de reformage catalytique	32
Tableau II -3	Bilan de masses de l'unité de reformage catalytique	41
Tableau II -4	Bilan de masse de la section prérationnement	42
Tableau II -5	Bilan massique prétraitement et reforming	42
Tableau III-1	composition du gaz Natural	46
Tableau III -2	caractéristique des fumées	50
Tableau III -3	composition des fumées	51
Tableau III -4	pouvoir calorifique du combustible	52
Tableau III -5	Enthalpie des fumées	53
Tableau III -6	Les données de départ	54
Tableau III -7	La Quantité d'oxygène ( $O_2$ ) nécessaire à la combustion	55
Tableau III -8	La Quantité d'ai nécessaire à la combustion	56
Tableau III -9	Caractéristique des fumées	57
Tableau III -10	Les quantités des produits de la combustion	58
Tableau III -11	les spécifications des fumées et de gaz combustible	59
Tableau III -12	Pouvoir calorifique du gaz combustible et le rendement	60

## Lister e des Figures

---

### Lister e des Figures:

Figure	Titre	page
Figure I-1	Four de bouteille	01
Figure I-2	Four à chaux	02
Figure I-3	Évolutions des températures et des puissances	07
Figure I-4	Fours à cloche mobile	09
Figure I-5	Vue d'un four verticale (boîtes)	13
Figure I-6	Vue d'un four horizontal (cabines)	14
Figure I-7	Four de cuisson de pièces céramiques	19
Figure I-8	Recirculations des fumées, induites par un brûleur, dans un espace confiné	19
Figure III -1	schéma d'ensemble du four F202201	44
Figure III -2	schéma du four F202201 (intérieur)	45
Figure III -3	Les données de départ	55
Figure III -4	La Quantité d'oxygène (O <sub>2</sub> ) nécessaire à la combustion	56
Figure III -5	La Quantité d'air nécessaire à la combustion	57
Figure III -6	Caractéristique des fumes	57
Figure III -7	Composition des fumes	58
Figure III -8	les spécifications des fumées et de gaz combustible	59
Figure III -9	Pouvoir calorifique du gaz combustible et le rendement	60
Figure III -10	La variation de débit de combustible en fonction de rendement	61



# **Introduction générale**

---

## Introduction générale:

L'énergie occupe une place importante dans la vie humaine. Les progrès de la science et de la technologie ont permis à l'humanité de découvrir de nouvelles sources d'énergie, ce qui signifie que tous les produits énergétiques que nous empruntons au pétrole et au gaz naturel nécessitent plus d'énergie, et surtout.

Les principales sources d'énergie primaire sont les combustibles fossiles (gaz naturel, charbon, pétrole). L'énergie est essentielle au fonctionnement normal des activités économiques, car chaque conversion de matières premières, chaque entreprise et chaque action nécessite de l'énergie. Les activités économiques telles que la production industrielle, le transport, le chauffage des bâtiments et l'utilisation de divers équipements électriques consomment de l'énergie; l'efficacité énergétique, la dépendance énergétique, la sécurité énergétique et le prix sont les principaux enjeux. La consommation d'énergie permet de répondre aux besoins toujours croissants de l'humanité.

Le raffinage du pétrole fait référence à tous les traitements et transformations qui visent à extraire le maximum de produits ayant la plus grande valeur commerciale du pétrole. Habituellement, ces processus sont combinés dans les raffineries en fonction d'objectifs.

Le pétrole est un mélange de différents produits hydrocarbonés, il doit subir une série de traitements avant de pouvoir être utilisé dans divers domaines des moteurs à combustion interne et de l'industrie (produits pétrochimiques, etc.). Généralement, la qualité du blanc dépend dans une large mesure de sa source. Cela détermine sa couleur, sa viscosité, sa teneur en soufre, son point d'écoulement et sa teneur en minéraux, qui sont des facteurs à prendre en compte dans le processus de raffinage.

La raffinerie doit être conçue pour traiter une gamme assez large de pétrole brut. Lorsque la ressource estimée d'un certain pétrole brut est suffisamment importante, une partie est adaptée au pétrole brut spécifique.

La raffinerie est de conception simple ou complexe, Les raffineries simples n'ont que quelques unités de traitement, tandis que les raffineries complexes en ont plus.

En fait, cela dépend de l'objectif et de l'emplacement de la raffinerie, ainsi que de la nature du pétrole brut à traiter; la structure de la raffinerie proposée est différente; également en fonction de la demande locale potentielle, la raffinerie peut être très simple. Ou très complexe.

Le raffinage du pétrole commence par la distillation ou le fractionnement du pétrole brut pour le séparer en différents hydrocarbures. Le produit obtenu dépend directement des

---

---

caractéristiques du pétrole brut traité. Ensuite, convertissez la plupart de ces produits de distillation en produits plus faciles à utiliser, modifiez leur structure physique et moléculaire par craquage, reformage et autres processus de conversion, puis effectuez divers traitements et processus de séparation sur les produits résultants, tels que l'extraction et l'hydrogénation Cracking et édulcorant. Produire des produits finis. Dans les raffineries plus simples, il est généralement complété par une distillation atmosphérique et sous vide, tandis que dans les raffineries intégrées, le fractionnement, la conversion, le traitement et le mélange sont effectués pour produire de l'huile lubrifiante et du fioul lourd; ces raffineries peuvent aussi comporter des installations de traitement pétrochimique.

Le raffinage du pétrole brut, ou l'industrie de la conversion des dérivés du pétrole, comprend toutes les activités qui relèvent de l'industrie pétrolière, de même que toutes les opérations d'importation commerciale. Ou l'exportation, l'admission temporaire ou toute autre a choisi directement ou indirectement lié au raffinage. Ce processus de raffinage nécessite différentes techniques de traitement tel que le fractionnement et le chauffage.

Chaque entreprise veut très bien contrôler ses dépenses et, pour ce faire, et pour assurer une bonne gestion budgétaire, il est nécessaire de maintenir la cohérence des recettes et des dépenses. Par conséquent, **la consommation de gaz combustible dans le processus de production** est très importante pour augmenter ou diminuer le prix de revient de l'entreprise.

---



# **Chapitre I**

**Etude Bibliographique**

---

## I. Introduction:

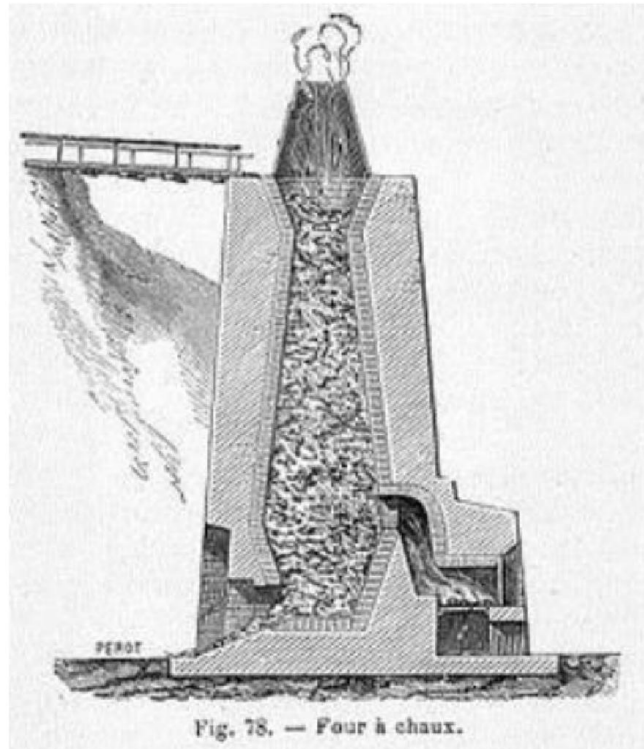
Depuis la plus haute antiquité, l'homme a cuit la pierre calcaire ou le gypse pour l'utiliser ensuite comme liant dans les constructions. Cette cuisson s'est faite dans des fours qui étaient de simples coves.

Les Romains perfectionnent le procédé en remplaçant le calcaire, contenant de l'argile donnait après cuisson un liant hydraulique. L'année 1756 où Laucien SMEATION démontre que l'hydraulicité provient de l'argile dans le mélange qu'il cuisait à feu modéré dans des fours "BOUTEILLE"



**Figure I-1** Four de bouteille.

Plus tard ASPDIN en 1824 [15] et JOHNSON en 1844 [16] perfectionnèrent la technique de leur confrère "SMEATION" ; il créa des fours où il s'efforça de rattraper une partie de la chaleur qui s'échappait dans les fumées pour sécher et préchauffer la matière à cuire et a fait passer les fumées sous des plateaux contenant la pâte à sécher, mais ces fours ont un inconvénient de discontinus et de faible production et consommaient beaucoup d'énergie.



**Figure I-2** Four à chaux

Et c'est en 1953 qu'une nouvelle invention a vu le jour pour réduire la consommation thermique des fours. Il s'agit des fours HUMBILDT [18] avec préchauffeurs à suspension gazeuse.

Dans ce type de four, les gaz chauds provenant de l'aval du four transmettent leur chaleur à une farine qui descend dans une série de cyclones disposés l'un au-dessus de l'autre à l'amont du four appelé four à 04 étages.

C'est pourquoi la consommation de carburant des fours est dépassée et nécessite des solutions constants.

### **I. Description des fours industriels:**

Un four est une coque ou un appareil de maçonnerie entraîné par un système de chauffage Puissant, peut transformer des produits et des objets par la chaleur . Dans la cuisine, vous pouvez cuisiner aliments. Pendant la production de l'objet, le four peut être traité Objets chauffés: poterie, céramique, verre, métal ...

Le four est un outil utilisé pour élever la température à une limite spécifiée, donc Transformez le produit. Il peut être:

- ✓ Avant Équipement utilisé uniquement pour le chauffage (par exemple, le chauffage de l'acier avant déformation plastique, chauffage du pétrole brut avant distillation);
- ✓ Le réacteur réel où le produit est fabriqué (par exemple, four, Verre, four de vapocraquage pétrochimique).



---

Il convient généralement aux lignes de production complexes. nous découvrons  
Le creuset d'un grand nombre d'activités industrielles Dans l'ensemble, c'est délicat.  
La présence des fours spécifiques dans l'industrie notamment:

- Les fours de l'industrie sidérurgique.
- Les fours de traitement thermique des métaux.
- Les fours de raffinage et de l'industrie chimique.
- Les fours de cimenterie.
- Les fours de l'industrie verrière.
- Les fours des industries céramiques et des produits réfractaires

## **II.Généralité sur Les Fours Dans l'Industrie Pétrolière:**

Les fours constituant un équipement clé pour l'industrie de raffinage et de la pétrochimie et doivent, grâce à leur conception, répondre aux exigences nombreuses émises par les utilisateurs comportant essentiellement une charge thermique déterminée, un rendement thermique minimum, un bon facteur de marche et une flexibilité d'opération satisfaisant avec le souci de respecter les impératifs de sécurité. Ces appareils élaborés doivent être conçus également en fonction de l'accroissement progressif de taille et d'une supervision confiée de plus en plus l'instrumentation automatique qui caractérise l'évolution technique de cette industrie de masse.

Les engineering et fabrication de matériels consacrent par ailleurs, une part importante de leurs activités à l'étude et à la réalisation des fours destinés au traitement des hydrocarbures et des dérivés du pétrole. Qu'il s'agisse des tubes, des réfractaires, des brûleurs ou des charpentes métalliques, les choix à opérer sont nécessairement liés par la recherche de la satisfaction à un juste coût des demandes de l'industrie cliente.

Il apparaissait donc tout à fait opportun que soient confrontées préoccupation des utilisateurs avec celle des techniciens des bureaux d'études et des entreprises de fabrication de manière à établir un ensemble de normes qui puisse servir de guide reconnu par tous.

La place occupée par les fours, dans l'industrie pétrolière et pétrochimique est importante.

En effet:

- du prix de revient de l'unité
- d'une unité de production peut atteindre 20%
- bonne marche d'une unité.

Ils doivent absorber toutes les variations de fonctionnement process (débit massique, débit calorifique) avec des combustibles aux caractéristiques variables.

---

Or, la moindre défaillance peut compromettre et voir même stopper la marche de l'unité avec toutes les conséquences que nous savons.

D'où, l'importance des problèmes posés par la conception, la construction, la conduite des fours. Considérant que la réalisation et le fonctionnement de ceux-ci font appel à un grand nombre de discipline et pose de sérieux problèmes technologiques ; sachant également que l'évolution des techniques, des conditions d'exploitation et de la politique des prix conduisent vers une optimisation entre les investissements, la qualité du matériel et la sécurité de marche, l'idée nous est venue de nous pencher en profondeur sur les problèmes ainsi évoqués.

### **III. Domaine d'utilisation des fours tubulaires :**

Dans les plus part des utilisations de raffineries ou pétrochimie, l'apport de chaleur nécessaire au procédés mis en œuvre se fait par l'intermédiaire d'un four à chauffage direct dans lequel les calories produites par la combustion sont transmises par les mécanismes de la radiation, de la conduction et de la convection au fluide à réchauffer qui circule dans un serpentin tubulaire ou un faisceau de tubes, d'où le nom (**four Tubulaire**) que l'on donne à ce type d'appareil.

Les usages de ces 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 peut citer les exemples suivants :

#### **1. Réchauffage d'un fluide sans changement de phase :**

C'est le cas par exemple, des fours à huile chaude placés sur un circuit alimentant plusieurs échangeurs où se fait le transfert des calories au procédés ; c'est encore le cas des fours de charge de certaines installation où il s'agit de porter le fluide à la température nécessaire pour obtenir une réaction chimique qui se produit dans une capacité extérieure au fours (réacteur) au présence ou non d'un catalyseur. Ou bien encore, il s'agit 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. Des produits à un niveau convenable lorsque l'endothermicité de la réaction est importante.

#### **2. Réchauffage d'un fluide avec vaporisation simple (vaporisation partielle) :**

---

C'est le cas de la plupart des fours de distillation (Fours de charge ou four de rebouillage en fond de la colonne).

Les fours de ce type sont d'ailleurs les nombreux et sont, en générale, ceux dont la capacité thermique est plus élevée.

### **3. Réchauffage d'un fluide avec réaction chimique :**

C'est le cas des fours de charge des unités de craquage catalytique et de reforming thermique.

Le produit est d'abord réchauffé jusqu'à la température de réaction, puis est maintenu à cette température un certain temps dans une section spéciale du faisceau appelée zone de soaking ou de naturation; où les calories transmises compensent celles absorbées par la réaction

Dans certains cas, lorsque la réaction se fait en présence de catalyseur, celui est placé dans les tubes même du four. Il s'agit là de fours un peu particuliers qui sortent de cadre de notre étude.

## **IV. Classification :**

Toute classification est arbitraire, elle est toutefois utile dans la mesure où elle permet de retrouver des caractéristiques communes à des équipements, à première vue, très différents.

Nous proposons ici deux classifications, en fonction :

- De la manipulation du produit : fours continus ou discontinus.
- Du procédé de chauffage : direct ou indirect
- du niveau de temperature
- du combustible

### **V.1 Fours continus et fours discontinus**

C'est la manutention et la circulation du produit qui est ici le critère.

Dans un four continu, le produit à chauffer entre à une des extrémités et en ressort à l'autre.

C'est le cas :

- des fours de réchauffage de semi-produits (fours à longerons et fours poussants) de la sidérurgie .

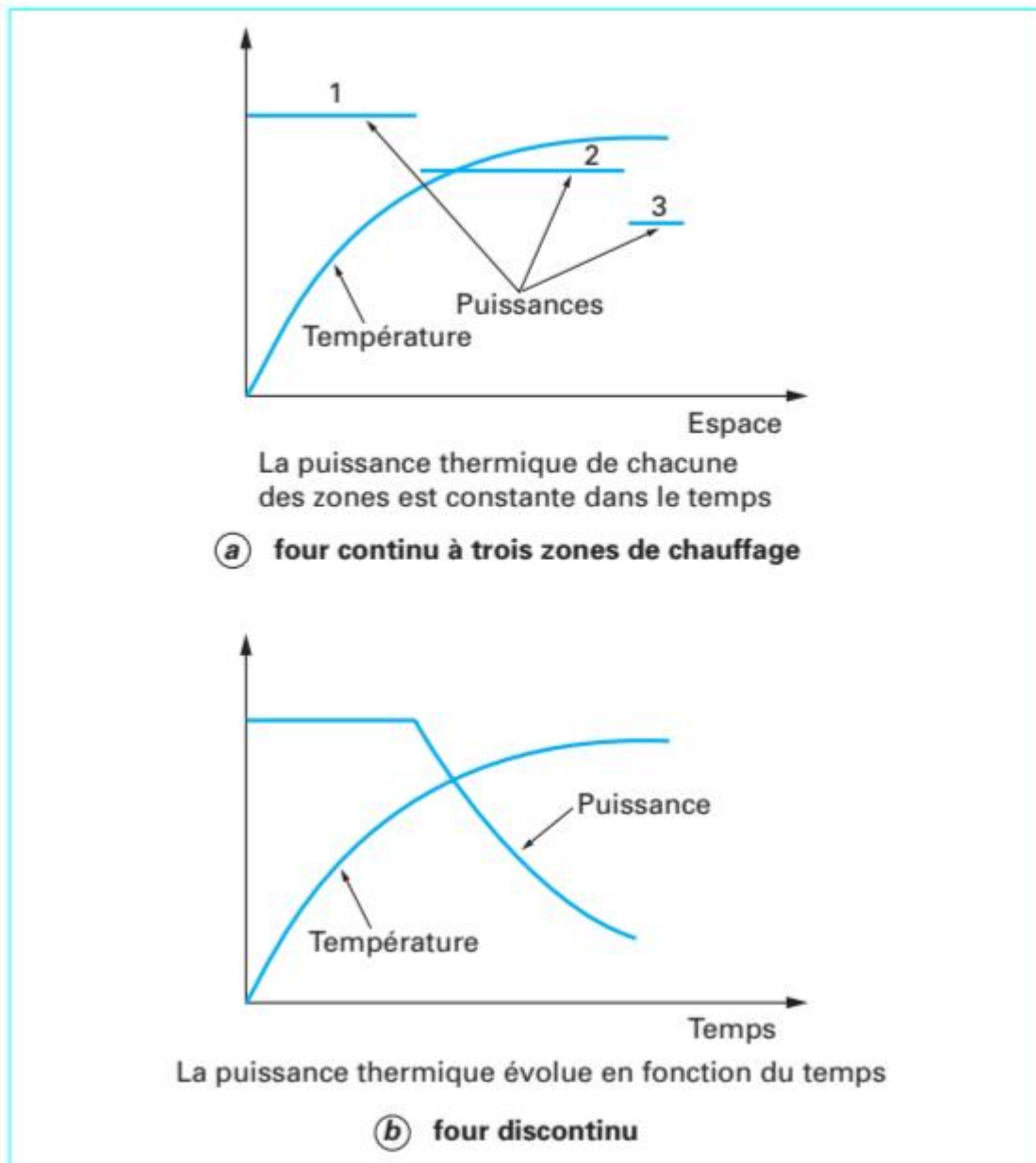
- 
- des fours de l'industrie chimique et du raffinage .
  - des fours rotatifs de l'industrie cimentière.

Dans un four discontinu, le produit à chauffer est immobile dans le four ; il est chargé et déchargé (enfourné et défourné) au même endroit. C'est le cas :

- des fours à sole mobile de forge .
- des fours à soles fixes de traitement thermique .
- des fours à cloches mobiles et élévateurs.

Cette différence dans la manutention entraîne des différences notables du point de vue thermique.

- Dans un four continu, un point du four sera toujours (ou à peu près) à la même température. Dans un four discontinu la température en un point donné du four évoluera en fonction du cycle de chauffage que l'on veut faire subir au produit.



**Figure I-3** Évolutions des températures et des puissances de chauffe dans les fours

## V.2 Chauffage direct et chauffage indirect

Le critère est ici est le contact entre le produit et les gaz issus de la combustion.

- 1) **Fours à chauffage direct** : il y a contact entre les gaz issus de la combustion et les produits à chauffer. Du point de vue thermique, cela entraîne qu'une partie du transfert de chaleur s'effectue par convection.
- 2) **Fours à chauffage indirect** : l'interaction entre les gaz de combustion et les produits n'existe plus. Par contre, il s'introduit une résistance supplémentaire au transfert de chaleur qui doit se faire par conduction au travers de la paroi

---

protectrice, puis par rayonnement et éventuellement convection vers la charge.

Ils sont dits à chauffage direct, car la chaleur des fumées est cédée directement au fluide froid qui circule dans un serpentín 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.

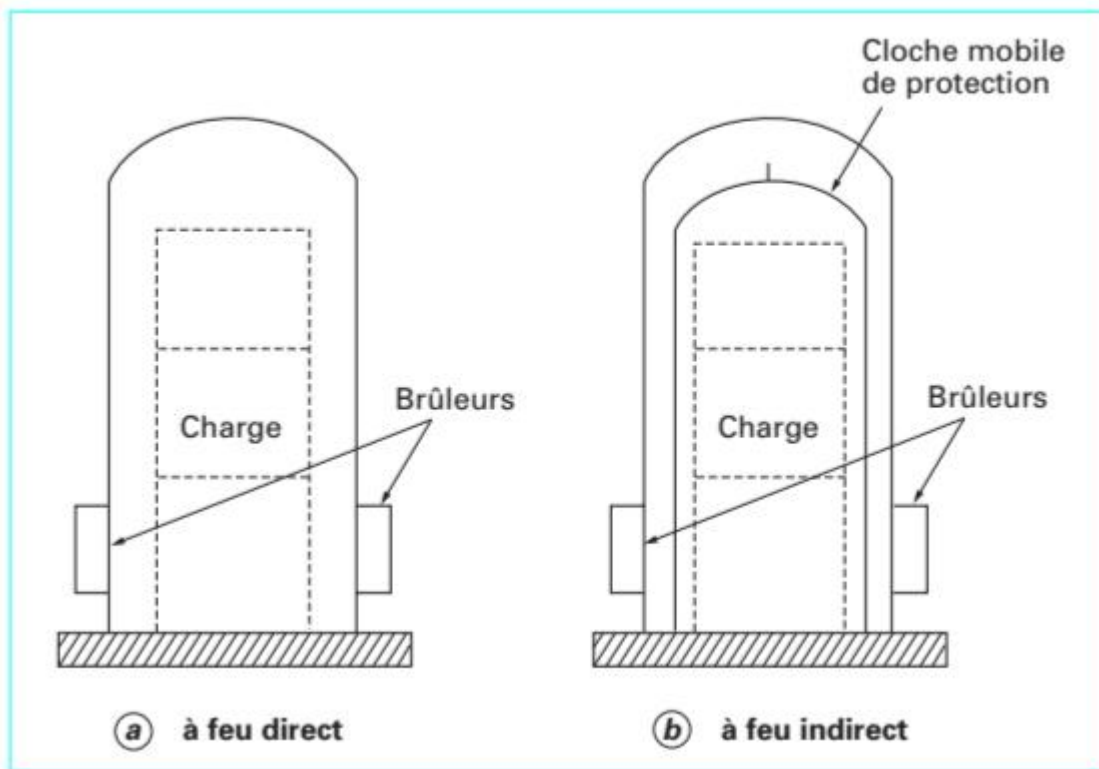
Les fours à chauffage direct doivent aussi être distingués des fours à chauffage par mélange (tels que les régénérateurs de catalyseur), dans lesquels le fluide à réchauffer est porté en température par mélange avec les fumées d'un combustible.

La chaleur transmise au fluide chauffé peut servir :

- A un simple réchauffage : on élève la température du fluide traité afin de lui faire subir, ultérieurement, une transformation physique ou chimique (surchauffeur de vapeur, réchauffeur de gaz d'un reformeur catalytique, réchauffeur d'hydrocarbure liquide (charge d'unité de craquage catalytique, fluide caloporteur, etc...)
- A une transformation chimique : celle-ci peut s'effectuer par pyrolyse (fours de craquage à la vapeur pour la fabrication d'éthylène, fours de craquage de dichloréthane, four de craquage d'acide acétique, etc..).

Dans d'autres cas, la transformation s'effectue en présence de catalyseur (fabrication de gaz de synthèse à partir de gaz naturel ou de naphta, fours de craquage d'alcool isopropylique, etc...)

- Mais dans le cas le plus courant, plusieurs opérations sont effectuées, simultanément ou successivement, dans le même four (par exemple : four de viscoréduction, où l'on a fourni de chaleurs sensible, de réaction (craquage thermique) et de vaporisation. Par ailleurs, plusieurs fluides distincts peuvent être réchauffés simultanément dans un même four, on dit que le four assure divers services. Cependant, en général, dans ce cas un seul des services.



**Figure I-4** Fours à cloche mobile

### V.3 Fours à haute et fours à basse température

La classification est ici plus arbitraire car une même température peut être considérée comme *haute* dans un type d'activité et *basse* dans une autre activité

Exemple : une température de sera considérée comme haute dans l'industrie chimique et basse en sidérurgie ou dans l'industrie du verre

Même si cette limite est un tant soit peu arbitraire, elle n'en est pas moins réelle. D'un point de vue technologique, au-dessus de 700 à 800 , il devient délicat de construire des fours à chauffage indirect.

D'un point de vue thermique :

- au-dessus de 1 000 , le transfert de chaleur se fait essentiellement par rayonnement ;
- au-dessous de 700 , la part de la convection devient non négligeable et on cherchera à l'améliorer par mise en circulation des gaz autour du produit.

Exemple :

les fours de détensionnement de pièces chaudron nées qui fonctionnent autour de 650

### V.4 Combustibles:

On peut également classer les fours en fonction de l'énergie utilisée. Le type d'énergie disponible et utilisé a, en effet, un impact important sur la conception, l'utilisation et l'exploitation des fours.

---

On trouvera dans le domaine des fours industriels, avec plus ou moins d'importance selon les activités, toutes les formes d'énergie :

- des fours électriques : il s'agit des fours à résistances (effet Joule), à arcs, à induction, à électrodes submergées, etc. ;
- des fours à gaz ; ils utilisent le gaz naturel, mais aussi le gaz de cokerie, le gaz de raffinerie, le gaz de haut-fourneau, etc. ;
- des fours à combustibles liquides : ils utilisent le fuel lourd, mais aussi le gazole, le naphta, etc. ;
- des fours à combustibles solides : ils utilisent les charbons ou le coke de pétrole (généralement sous forme pulvérisée), mais aussi les déchets divers.

Exemple : les pneus usagés qui sont incinérés dans les fours de cimenterie

#### **V. Constitution d'un four :**

Généralement, le four comprend les parties principales suivantes:

- ✓ Une zone radiante est aménagée dans le tube, qui se compose principalement d'une chambre de combustion. Ces tubes sont continus et reliés les uns aux autres par des coudes. La chaleur est principalement transmise par rayonnement. Un petit échange est effectué par convection entre le gaz de combustion et le tuyau.

La température des fumées sortant de la zone radiante est plus élevée (700 à 1200 ° C), donc le rendement est plus faible (environ 50% du pouvoir calorifique inférieur).

- ✓ Afin de récupérer la chaleur sensible de la fumée. Ce dernier circule à grande vitesse (parallèle ou verticale) à travers un tas de tubes, et l'échange se produit

Principalement par convection, cette zone est donc appelée section de convection. Ces tubes peuvent être doublés d'ailettes ou d'aiguilles pour augmenter la surface d'échange du côté des fumées, qui est généralement le fluide avec la résistance thermique la plus élevée.

L'efficacité d'un four à zone de convection est très élevée, ce qui est supérieur à celui d'un four à une seule zone radiante.

- Une cheminée aux multiples fonctions, son premier objectif est d'évacuer les gaz de combustion dans l'atmosphère, et sa hauteur ne nuira pas à l'environnement environnant.

Cependant, la cheminée et son tirage rendent la chambre de combustion à basse pression, de sorte que l'air nécessaire à la combustion entre par le registre de la



---

chambre de combustion. Par conséquent, ses dimensions doivent être calculées pour obtenir le dessin.

## **VI. Les différents types de fours :**

Il existe de nombreuses dispositions des tubes, dans la zone de radiation et de convection, et d'une zone par rapport à l'autre. Il en résulte de nombreux types de fours. On peut, toutefois, distinguer les différentes catégories suivantes :

### **1) Les fours cylindriques verticaux :**

La zone de radiation se présente sous la forme d'un cylindre à axe vertical. Les brûleurs sont placés sur la sole, à la base du cylindre.

Les brûleurs sont placés sur la sole, à la base du cylindre. La surface d'échange couvre les parois verticales et présente donc une symétrie circulaire par rapport au groupe de chauffage.

### **2) Les fours dits (boîtes) 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) Les fours dits (cabines) à tubes horizontaux :**

Dans ces fours, la forme générale de la zone de radiation est celle d'un parallélépipède, dans le plus grande longueur est horizontale. Les tubes sont placés horizontalement le long des parois latérales les plus longues. 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. 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.

### **4) Les fours à chauffage par murs radiants :**

La surface d'échange est placée dans le plan médian de la chambre de combustion. Les brûleurs sont répartis sur les parois latérales longitudinales.

---

### **5) Les fours à double chauffe :**

Dans ces derniers, le plan des tubes constituant la surface d'échange, est le plan médian des rangs brûleurs.

Pour tous les types de fours cités ci-dessous, à l'exception des cas où les brûleurs sont en voûte, la zone de convection peut être située au-dessus du four. La zone de convection peut également être placée le côté de la zone de radiation. Dans ce dernier cas des carneaux de fumées très chaudes assurent la liaison entre les deux zones.

Les tubes constituant la surface d'échange de la zone de radiation sont placés devant le garnissage réfractaire isolant de l'enveloppe. Un espace égal à environ un diamètre de tube est maintenu entre les tubes et cette paroi réfractaire. La chauffe du tube, bien qu'inégalement répartie, se fait sur toute la périphérie.

L'enveloppe du four n'est pas parfaitement étanche, notamment suite au vieillissement et au nombreux passage de tubes.

Pour des raisons de sécurité (four placé dans une atmosphère confinée) ou pour sauvegarde du matériel, l'intérieur du four est maintenu en dépression par rapport à l'air extérieur.

Cette dépression est, le plus souvent, obtenue par le tirage de la cheminée, ou quelquefois, par un ventilateur de tirage. Ces organes sont placés directement au-dessus de la zone de convection, ou au sol à la côté du four.

L'air de combustion est introduit dans les brûleurs, soit par la dépression régnant dans la chambre de combustion (brûleur à tirage naturel), soit à l'aide d'un ventilateur (tirage soufflé ou forcé.).

Pour assurer la combustion complète du combustible, un excès d'air, par rapport à la valeur stœchiométrique, doit être ajouté. Cet excès d'air dépend du brûleur, de la température de l'air de combustion et principalement du combustible .

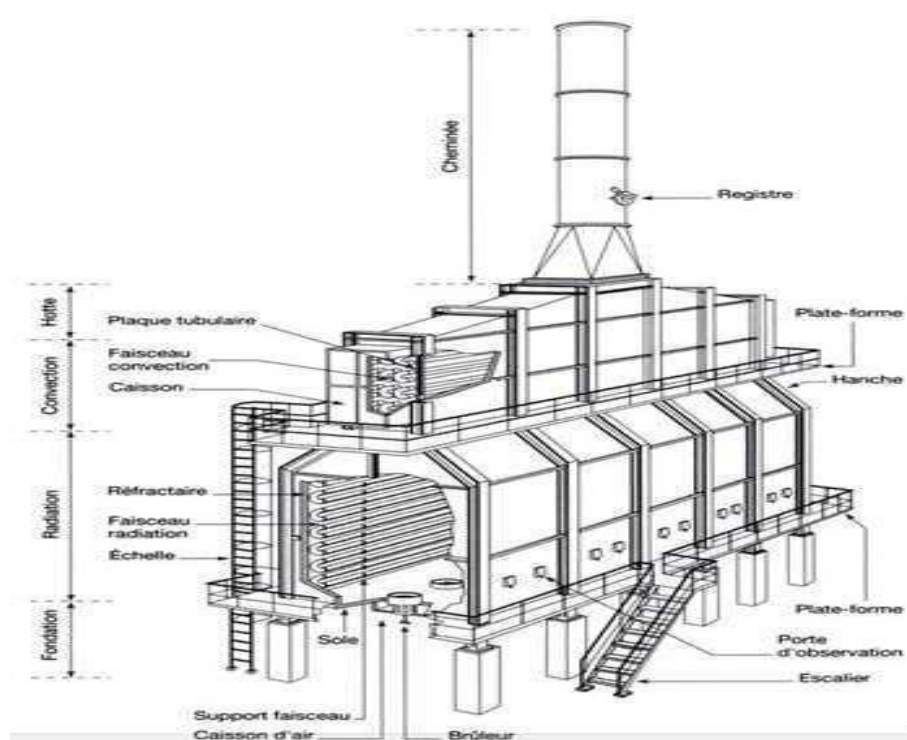
Les valeurs d'excès d'air les plus couramment admises sont, en pour-cent de l'air stœchiométrique :

#### **Le choix d'un type de four dépend principalement des facteurs suivants :**

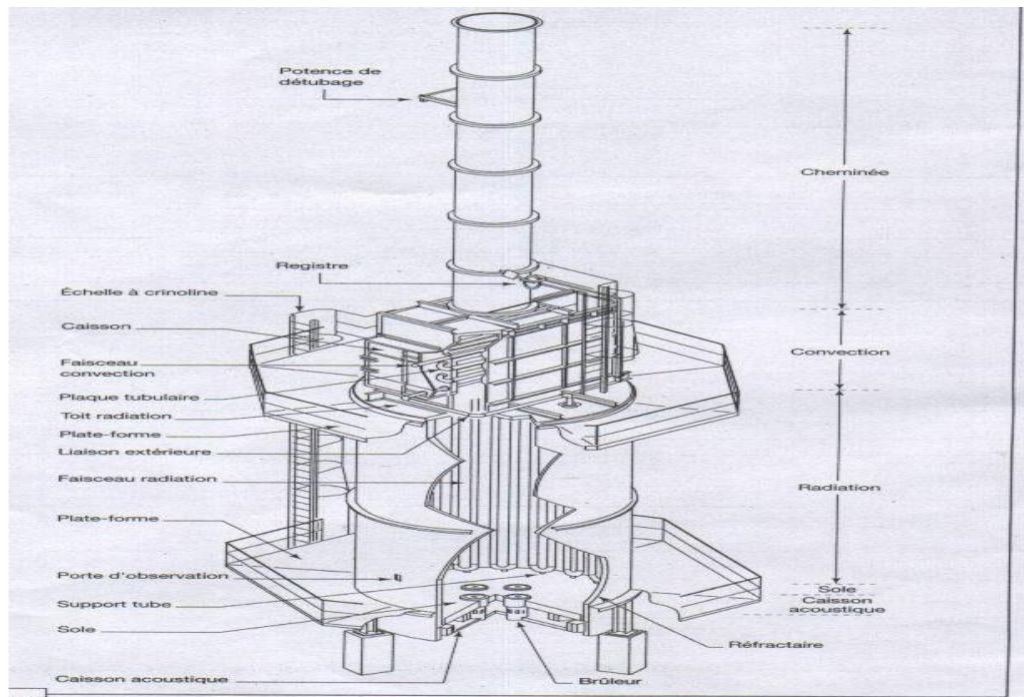
- ✓ Nature de produit chauffé et condition de service (débit, température, pression).
- ✓ Dérivabilité des faisceaux tubulaires.
- ✓ Présence ou non de catalyseur dans les tubes.
- ✓ Combustible.

- ✓ Encombrement
- ✓ Facilité de construction ou de transport.
- ✓ Coût pour une application donnée

La part d'investissement de ce matériel au sien d'une unité de production peut atteindre 20% du prix de revient de l'unité.



**Figure I-5** Vue d'un four verticale (boîtes)



**Figure I-6** Vue d'un four horizontal (cabines).

## VII. Rendement d'un four :

Les pertes de chaleur à travers les parois de four dépendent de l'épaisseur de la matière de garnissage réfractaire isolant. Les pertes sont faibles pour un garnissage isolant économiquement optimum, les pertes sont faibles. Pour un four d'une puissance de **10MW** ou plus, elles sont de **1 à 2%** du pouvoir calorifique inférieure.

Ces pertes sont plus importantes pour un petit four, car le rapport de la surface des parois de l'enveloppe, par rapport au volume de la chambre de radiation, diminue lorsque la taille du four augmente.

Les pertes de chaleur les plus importantes sont celles dues au rejet par la cheminée des fumées chaudes. Celles-ci sont le résultat de deux facteurs : le débit des fumées et leur température. Le débit des fumées s'accroît avec l'excès d'air. Il y a donc lieu de fonctionner avec un excès d'air aussi faible que possible; tout en veillant à obtenir une combustion complète sans imbrûlés plus important que le gain réalisé par la réaction de l'excès d'air.

Indépendamment de la perte due à la chaleur latente des imbrûlés, ceux-ci entraînent l'encrassement des surfaces d'échange et, par conséquent une élévation de la température des fumées qui persiste après le retour à un fonctionnement est imbrûlée.

---

Mais la température des fumées constitue le facteur principal des pertes de chaleur dans un four. D'ailleurs pour des fumées froides, l'excès d'air n'a plus d'importance puisque toute la chaleur cédée à l'air en excès a été récupérée sur les fumées. Pour refroidir les fumées, il est nécessaire de disposer d'un fluide froid à chauffer. Si le fluide à chauffer est à une température élevée qui ne permet pas d'obtenir une température des fumées suffisamment basse, c'est à dire un rendement thermique satisfaisant.

## **VIII. La combustion dans un four :**

### **1. Généralités :**

La combustion dans les fours pétroliers et pétrochimique se fait dans une chambre appelée également zone de rayonnement. Le faisceau absorbant en radiation étant disposé le long des murs réfractaire est donc soumis au rayonnement direct de la flamme qui se développe très souvent entièrement dans la chambre.

La combustion s'effectue à l'aide des brûleurs à pulvérisation de vapeur capable de brûler des combustibles liquides ou gazeux aux caractéristiques variables et très différentes.

La combustion se fait suivant les équations de réaction classique avec des excès d'air variant de 10% à 40% selon les équipements de chauffe.

### **2. Définition de la chaleur de combustion :**

On appelle (chaleur de combustion) à pression constante d'un corps simple ou d'un composé chimique défini le nombre de grandes calories dégagé par la combustion avec l'oxygène d'une partie de ce combustible égale à une unité de masse. La combustion a lieu à la pression normale de **760 mmHg** avec le combustible, l'oxygène, les fumées pris à la température initiale **0°C**, et l'eau produite par la combustion est totalement condensée.

### **3. Réactions de combustion :**

Connaissant la composition des combustibles, l'excès d'air imposé et le taux de la vapeur de pulvérisation des brûleurs, nous résoudrons l'équation de réaction afin déterminer la composition des gazes provenant de la combustion.

- ✓ En effet, il sera utile de connaître cette composition pour :
- ✓ Dimensionner le four
  - ✓ Dimensionner les carreaux et la cheminée
  - ✓ Evaluer la quantité des produits agressifs libérés

Les principales réactions des combustions neutres sont données dans le tableau, avec une température de référence de °C. Ces réactions permettent de déterminer la quantité d'air nécessaire aux brûleurs ainsi que la composition et la quantité des fumées sèches et humides

produites à partir d'un combustible :

Combustibles	Réactifs de combustion	Eau vapeur(Kcal)	Eau Liquide(kcal)
C	$C + 2O_2 \rightarrow CO_2$	97.6	---
C	$C + \frac{1}{2}O_2 + 2H_2 \rightarrow CO + 2H_2O$	29.4	---
S <sub>2</sub>	$S_2 + 8O_2 \rightarrow 2SO_2 + 8O$	138.6	---
S <sub>2</sub>	$S_2 + 3O_2 + 12H_2 \rightarrow 2SO_2 + 12H_2O$	183.6	---
H <sub>2</sub>	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 + 2H_2 \rightarrow O_2 + 2H_2O$	58.2	69.1
CO	$CO + \frac{1}{2}O_2 + 2H_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	68.2	---
CH <sub>4</sub>	$CH_4 + 3O_2 + 12H_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 8H_2$	192.5	21 4.3
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	$C_2H_4 + 3O_2 + 12H_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O + 12H_2$	319.7	34 1.5
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	$C_2H_2 + \frac{5}{2}O_2 + 10H_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O + 10H_2$	304.8	31 5.7
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	$C_6H_6 + \frac{15}{2}O_2 + 30H_2 \rightarrow 6CO_2 + 3H_2O + 30H_2$	751.5	74 8.2
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	$C_4H_{10} + \frac{13}{2}O_2 + 26H_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O + 26H_2$	625.7	68 0.2
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	$C_3H_8 + 5O_2 + 20H_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O + 20H_2$	485.1	52 8.7
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$C_2H_6 + \frac{7}{2}O_2 + 14H_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O + 14H_2$	<b>340,9</b>	<b>37</b> <b>3,6</b>

Tableau I-1 principales réactions de combustion

#### 4. Composition théorique des fumées :

La composition théorique des fumées s'exprime en pourcentage volumique ou massique. On obtient ces valeurs à partir du nombre de molécules des constituants que l'on détermine à l'aide des équations de réaction.

Soit pour les principaux constituants de fumées humides provenant de la combustion de **1Kg** de combustible :

❖ **Teneur théorique en produits agressifs :**

La connaissance de la teneur en produits agressifs s'impose aujourd'hui du fait de la réglementation sur la pollution atmosphérique.

Les principaux produits agressifs contenus dans les fumées produites par les combustibles utilisés sont le **CO<sub>2</sub>**, le **SO<sub>2</sub>** et le **NO**

Produit agressif	M g/mole	N Moles	% Volumique	Poids kg/kg	Volume Nm <sup>3</sup> /kg
CO <sub>2</sub>	44	n <sub>1</sub>	n <sub>1</sub> /N	<b>44n<sub>1</sub> x 10<sup>-3</sup></b>	<b>0,0224n<sub>1</sub></b>
SO <sub>2</sub>	64	n <sub>2</sub>	n <sub>2</sub> /N	<b>64n<sub>2</sub> x 10<sup>-3</sup></b>	<b>0,0224n<sub>2</sub></b>
N <sub>2</sub>	28	n <sub>3</sub>	n <sub>3</sub> /N	<b>28n<sub>3</sub> x 10<sup>-3</sup></b>	<b>0,0224n<sub>3</sub></b>
O <sub>2</sub>	32	n <sub>4</sub>	n <sub>4</sub> /N	<b>32n<sub>4</sub> x 10<sup>-3</sup></b>	<b>0,0224n<sub>4</sub></b>
H <sub>2</sub> O	18	n <sub>5</sub>	n <sub>5</sub> /N	<b>18n<sub>5</sub> x 10<sup>-3</sup></b>	<b>0,0224n<sub>5</sub></b>
Total		N	100	<b>Σ PMini</b>	<b>Σ0,0224ni</b>

**Tableau I-2** valeurs spécifiques des produits agressifs

❖ **Pouvoir calorifique supérieur et inférieur :**

✓ On appelle **pouvoir calorifique supérieur (PCS)** la quantité de chaleur, exprimée en Kcal, dégagée par la combustion à pression constante de 760 mmHg de 1 Kg ou de 1 Nm<sup>3</sup> d'un combustible à la température de (0°C), les produits de la combustion étant ramenés à la température de référence (0°C).

✓ On appelle **pouvoir calorifique inférieur (PCI)** la quantité de chaleur, exprimée en Kcal, dégagée dans les mêmes conditions que le (PCS), mais en

---

admettant que la vapeur provenant de la réaction de n'est pas condensée .

Les deux valeurs sont liées pour les gaz et les liquides par les relations respectives suivantes en négligent la contraction du mélange combustible carburant :

$$PCI = PCS - 10.9 n \quad n = \text{nombre de moles de H}_2\text{O.}$$

$$PCI = PCS - 53 H \quad H = \% \text{ poids de l'hydrogène dans le combustible.}$$

## **IX. Rôle de l'atmosphère et de la pression dans les fours**

### **1. Contrôle de la pression dans les fours**

La pression relative que l'on cherche à maintenir dans l'enceinte, ou le laboratoire, d'un four est de l'ordre de quelques dizaines de pascals. Cette pression peut être soit positive (fours à chauffage direct), soit négative (fours tubulaires de l'industrie chimique). Dans tous les cas, c'est un paramètre d'exploitation important qu'il faut suivre avec attention.

En effet, un contrôle déficient de la pression peut entraîner des déboires et des difficultés importants :

- ✓ détérioration de la qualité du chauffage dans les fours à chauffage direct .
- ✓ augmentation de la consommation spécifique et diminution du rendement .
- ✓ détérioration de la combustion dans les fours équipés de brûleurs à air induit .
- ✓ dégradation des parois en cas d'excès de pression. Le contrôle de cette pression se fait :
  - soit par action sur un registre placé dans le circuit d'évacuation des fumées .
  - soit par la variation de la vitesse de rotation d'un extracteur de fumées.

Ces actionneurs sont asservis à une mesure de la pression régnant en un ou deux points du four.

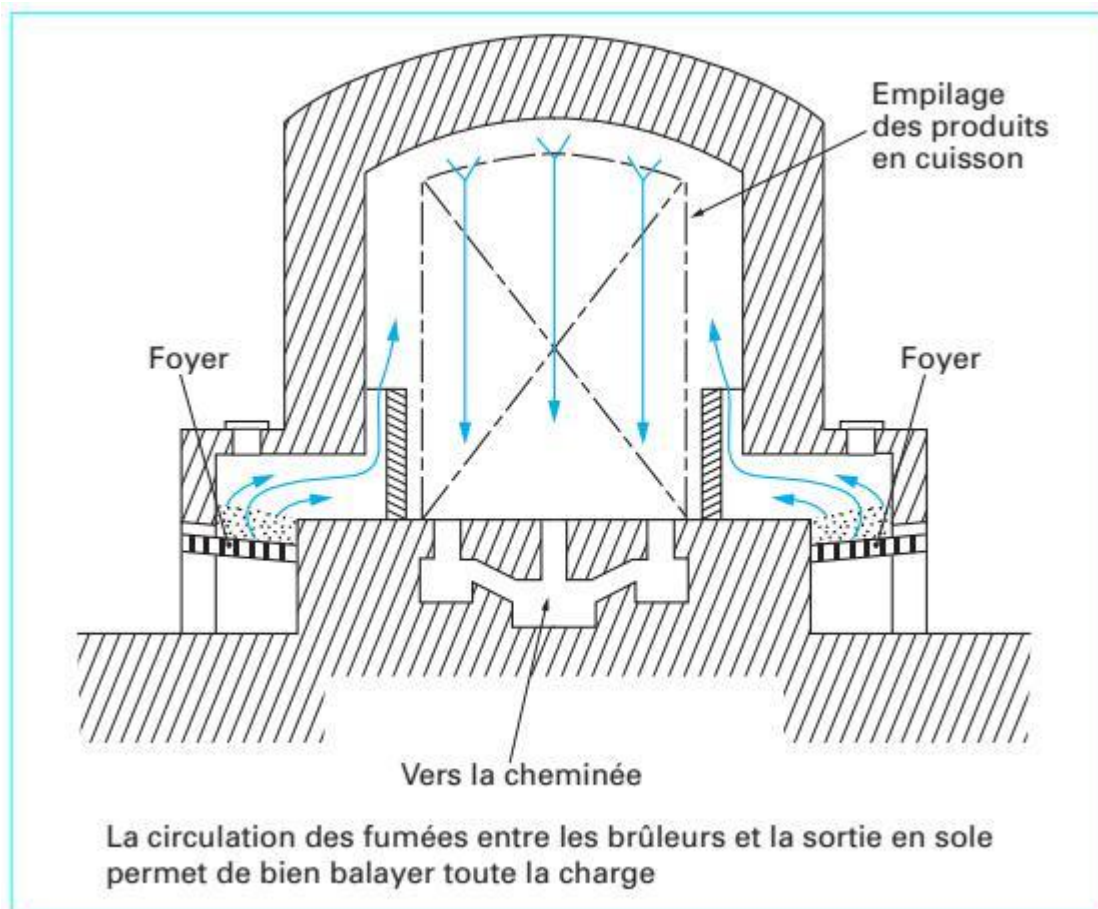
Compte tenu des dimensions de certains fours modernes (quelques centaines de mètres carrés), on voit qu'il y a intérêt à bien choisir ce (ou ces) points de mesure.

### **2. Circulation des fumées**

Globalement les fluides entrant dans le four par le (ou les) brûleur(s) traversent le four et en ressortent par les carneaux et la cheminée. Ce circuit est donc défini par les données géométriques de la construction. Il doit être, dans la mesure du possible, organisé de manière telle que la charge soit bien en contact avec les gaz produits par la



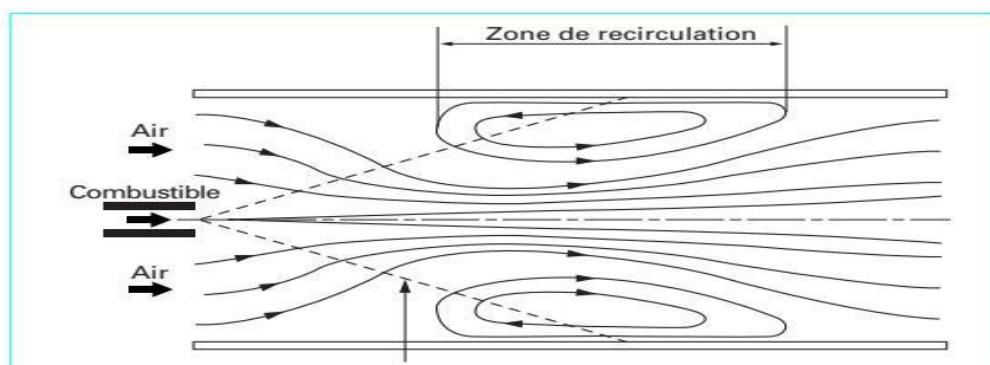
combustion .



**Figure I-7** Four de cuisson de pièces céramiques

En fait, à ce mouvement principal viennent se superposer des courants de circulation secondaires qui jouent un rôle important dans le fonctionnement. Ces courants secondaires sont :

- les circulations dans des plans verticaux, surtout sensibles dans les fours de grande hauteur et qui peuvent être favorisés par des fuites dans la voûte ; les recirculations induites par l'impulsion des brûleurs



**Figure I-8** Recirculations des fumées, induites par un brûleur, dans un espace confiné

---

### 3. Entrées d'air

Il s'agit de l'air ambiant qui pénètre dans l'enceinte du four par d'autres entrées que celles prévues au niveau des brûleurs.

Cet air non contrôlé est préjudiciable à tous points de vue :

- il diminue le rendement de combustion .
- il refroidit les produits lorsqu'il s'introduit à proximité du défournement .
- il engorge le circuit d'extraction des fumées .
- il modifie l'atmosphère gazeuse du four ; etc.

Ce sont évidemment les fours qui fonctionnent en dépression qui sont les plus sensibles à ces entrées d'air parasites. Elles peuvent également se produire dans des fours, supposés en pression positive, mais dans lesquels les phénomènes de circulation des gaz peuvent induire localement des zones en légère dépression, au niveau de la sole ou à proximité des portes et des brûleurs.

### 4. Interaction entre l'atmosphère et les produits à chauffer

Les gaz présents dans les produits d'une combustion avec excès d'air ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ) ont toujours, à haute température, une action sur les produits ou les constituants du four. Ces effets, l'**oxydation** et la **décarburation** peuvent, dans certains cas, être inacceptables et l'on pourra être amené :

– soit à rechercher une combustion avec défaut d'air, généralement important : c'est par exemple, le cas des **fours dits à chauffage sans oxydation** pour le réchauffage des métaux ;

– soit à utiliser un gaz d'atmosphère, élaboré par ailleurs que l'on mettra en contact avec les produits : **fours de traitements thermique dits à atmosphère contrôlée** qui sont, dans ce cas, obligatoirement à chauffage indirect.

## X. Isolation des fours

### 1) Conception générale

Les fours modernes comportent tous une enveloppe métallique (casing) généralement fortement charpentée pour reprendre le poids de la voûte, les poussées des parois réfractaires et les efforts engendrés par les dilatations des éléments constitutifs.

À l'intérieur de cette enveloppe, on dispose plusieurs couches de matériaux isolants et réfractaires qui ont pour but :

- 
- de limiter les déperditions thermiques ;
  - de protéger l'espace environnant et le personnel d'exploitation.

## 2) Définitions

On distingue dans la construction réfractaire d'un four les éléments suivants.



### La sole

C'est un plan horizontal ou parfois incliné sur lequel reposent généralement les produits. La sole peut être fixe ou mobile (four à chariot, four à sole mobile) ; elle peut être directement au contact des produits solides (four tournant de forge) ou de produits liquides (four de fusion du verre).



### La voûte

Elle peut avoir des formes diverses : plate, cintrée, avec des rampants, suspendue. La voûte est en contact avec les gaz de combustion et, assez souvent, directement avec la flamme. Elle joue un rôle important dans le transfert de chaleur en renvoyant, par rayonnement sur les produits, l'énergie qu'elle reçoit de la flamme.



### Les murs verticaux ou piédroits

Ils font la liaison entre la voûte et la sole. Ils doivent reprendre le poids de la première et contenir les poussées de la seconde. Dans les fours où la charge est liquide, ils doivent également reprendre directement la poussée due à cette charge.

## 3) Physique des matériaux réfractaires

Les matériaux réfractaires dont on dispose sont de trois types :



les matériaux préculés ;



les matériaux non préformés ;



les matériaux fibreux.

### ○ Matériaux préculés

Ils se présentent sous forme de pièces standards (*briques, coins, couteaux*) ou de pièces de forme spéciale (*ouvreaux de brûleurs*). Ils sont cuits à haute température et sont, de ce fait, parfaitement stabilisés. Leur composition chimique dépend du niveau de réfractérité que l'on veut atteindre. Leurs dimensions augmentent légèrement au cours de la montée en température du four, d'où la nécessité de prévoir des joints de dilatation lors de la construction.

---

### ○ **Matériaux non préformés**

Ils sont mis à la disposition de l'utilisateur *en vrac*. Mélangé sur le chantier avec un liant et parfois un agrégat complémentaire, leur mise en forme et leur cuisson se fait sur place. On distingue :

- ✓ les bétons à liant hydraulique ;
- ✓ les plastiques à liant chimique.

Portés à leur température d'utilisation, ces produits subissent une céramisation qui vient relayer ou conforter les liaisons hydrauliques existantes lors de leur mise en place. Cette céramisation, se fait souvent avec un retrait dimensionnel dont il faut tenir compte lors de la conception et de la construction.

### ○ **Matériaux fibreux**

Ils sont composés de fibres de quelques centimètres de longueur et de quelques micromètres de diamètre mises sous forme de nappes, ou parfois sous forme de pièces de géométrie particulière. Les matériaux fibreux ont une densité apparente nettement plus faible que celle des produits précédents. Ils permettent donc de diminuer considérablement l'inertie thermique de la construction et sont, de ce fait, particulièrement bien adaptés pour les fours à fonctionnement discontinu ou cyclique. Ils permettent également grâce à leur très faible densité le diminuer considérablement le poids des voûtes et les efforts sur les piédroits.

## **4) Chimie des matériaux réfractaires**

Quelle que soit la forme physique sous laquelle se présente le matériau réfractaire, sa tenue à la température dépend principalement de sa composition chimique.

Les matériaux réfractaires les plus usuels sont obtenus à partir d'argiles silico-alumineuses et leur résistance à la température est fonction de leur teneur en alumine ( $Al_2O_3$ ), comme on peut le voir sur le tableau **1** qui donne la **résistance pyroscopique** (essai de laboratoire normalisé) en fonction de la teneur en ( $Al_2O_3 + TiO_2$ ) du matériau

En dehors des réfractaires silico-alumineux, on utilise pour certaines applications particulières des matériaux réfractaires à base de silice ( $SiO_2$ ) presque pure, de magnésie ( $MgO$ ) ou encore de zircon (ZrO<sub>2</sub>).

On retiendra que **les performances d'un réfractaire donné sont fortement dépendantes de sa teneur en impuretés**. Parmi celles-ci, les oxydes de sodium ( $Na_2O$ ) et

---

de potassium ( $K_2O$ ) et, à un moindre degré, les oxydes de fer ( $FeO$ ) jouent un rôle essentiel, car leur présence diminue considérablement la température maximale d'utilisation. On les désigne habituellement sous le terme de **fondants**.

### 5) Interactions entre les réfractaires et le four

Les réfractaires ne sont pas inertes par rapport à ce qui se passe dans le four et le choix des réfractaires qui se trouvent en contact avec les fumées, la flamme ou la charge est fortement conditionné par les caractéristiques de ces derniers.

Les **matériaux fibreux**, qui sont très poreux, sont exclus lorsqu'il y a contact avec une charge liquide ou lorsqu'il y a risque de projection de liquide. Ils sont également à éviter lorsque les gaz issus de la combustion comportent des éléments corrosifs (gaz sulfureux par exemple).

Au contact d'une charge liquide (fours de fusion), on utilise des **produits compacts** et lourds à forte teneur en élément réfractaire de base (alumine, magnésie ou autres).

Outre les corrosions d'origine chimique, les réfractaires peuvent être soumis à des érosions mécaniques. C'est le cas par exemple des fours poussants de métallurgie dans lequel l'avancement des produits par glissement impose, pour la sole, des matériaux réfractaires très durs (corindon, par exemple) ; des zones de convection des fours de raffinage du pétrole équipées de ramoneurs à vapeur, si les jets de vapeur peuvent venir au contact des parois ; des fours rotatifs dans lesquels la charge avance par glissement sur les parois.

### 6) Dimensionnement des parois réfractaires

Une fois déterminée la qualité de la première couche de réfractaire, en fonction du niveau de température dans le four et des interactions chimiques en surface, le choix et le dimensionnement des couches réfractaires et isolantes arrières sont choisis en fonction des déperditions thermiques et/ou de la température de paroi extérieure maximale acceptables. Ce calcul se fait généralement, en supposant l'équilibre thermique atteint, avec comme objectifs :

- de trouver un optimum entre des épaisseurs et des déperditions énergétiques économiquement acceptables ;

- 
- d'obtenir sur les parois extérieures une température compatible avec la circulation ou la présence de personnel.

Dans certains cas, les différentes contraintes sont incompatibles entre elles et sur certains fours (fours de fusion à haute température par exemple), on est conduit à refroidir les parois extérieures par de l'eau en ruissellement ou en circulation dans une double paroi métallique.

## **XI. Brûleurs de fours industriels :**

### **a) Importances du brûleur :**

Le brûleur a un rôle primordial dans la conception, la construction et le fonctionnement des fours :

- il fournit l'énergie thermique au four et à la charge ;
- il prépare la mise en contact du combustible et du comburant ;
- il provoque la circulation des gaz brûlés favorisant l'égalisation des températures dans l'enceinte ;
- il crée une liaison entre le casing extérieur du four et les parois en réfractaire qu'il Travers, et entraîne de ce fait, un point délicat dans la construction.

Il existe nombreux types de brûleur, certains spécifiques à un seul type de four ou/et à un seul combustible, d'autre à vocation plus large. Nous nous limiterons à essayer de dégrader quelque concept généraux sur ces matériels. La conception d'un brûleur de four est fonction :

- du combustibles et de la façon dont se fait le mélange combustible-comburant ;
- de l'espace disponible dans l'enceinte où se déroule la combustion ;
- de la forme que l'on souhaite donner à la flamme ;
- Pour cela on distingue :
  - les brûleurs à pré-mélange ;
  - les brûleurs à flamme de diffusion .

### **b) Brûleurs à pré-mélange :**

Le mélange entre le combustible et le comburant se fait préalablement à son introduction dans le four. Ces brûleurs sont uniquement des brûleurs à combustible gazeux. Ils produisent des flammes courtes et permettent d'obtenir localement des températures très élevées. Des

---

précautions particulières doivent être prises pour éviter la propagation de la combustion, vers l'amont, jusqu'au dispositif de mélange .

**c) Brûleur à flamme de diffusion :**

Le mélange entre le combustible et le comburant se fait à la sortie du brûleur ou au nez du brûleur, ces brûleurs concernent les combustibles gazeux, liquides et solides sous forme pulvérisée. Ils permettent, en agissant sur les vitesses et les écoulements, d'obtenir des formes de flamme très variées .

**XII. Avantages et inconvénients des fours industriels:**

- ✓ Une technologie capable de traiter simultanément une variété de déchets spéciaux Solide ou liquide
- ✓ La capacité de penser aux produits pétroliers qui nécessitent un grand effort thermique.
- ✓ Destruction complète des déchets dangereux par traitement thermique à haute température.
- ✓ Flexibilité opérationnelle en termes de «mélange» de déchets traités.- Fiabilité et longévité des installations (plus de 20 ans).
- ✓ La possibilité de produire de la vapeur pour des besoins industriels ou pour la production d'électricité.

**XIII. Conclusion :**

Dans l'ensemble, on peut dire que les fours industriels sont réels Un laboratoire qui peut chauffer de l'acier ou des produits pétroliers.

Le four industriel est un outil utilisé pour augmenter la température du produit, il peut Soit c'est un équipement dédié au chauffage, soit notre vrai réacteur Développement de produits. Quel que soit le type de four utilisé, l'objectif est de fournir aux produits une quantité de chaleur déterminée.

Le but du four est de transférer de l'énergie à la charge (produit) pour augmenter Température. Le transfert de chaleur passera par trois modes de transfert de chaleur (rayonnement, Convection, conduction), dans la plupart des cas en même temps, mais variable.



# **Chapitre II**

## **Raffinage de pétrole**



---

## **1- Introduction:**

Le raffinage a pour fonction de transformer des pétroles bruts d'origines diverses en un ensemble de produits pétroliers répondant à des spécifications précises, dans des proportions correspondant aussi bien que possible à la demande du marché. Les pétroles bruts présentent une large diversité du point de vue de leurs propriétés physiques et chimiques.

Le raffinage du pétrole débute par la distillation, ou fractionnement, du pétrole brut en vue de le séparer en différents groupes d'hydrocarbures. Les produits obtenus dépendent directement des caractéristiques du brut traité. On transforme ensuite la plupart de ces produits de distillation en produits plus facilement utilisables, en modifiant leurs structures physique et moléculaire par craquage, reformage et par d'autres procédés de conversion, puis on soumet les produits obtenus à divers procédés de traitement et de séparation tels que l'extraction, l'hydrocraquage et l'adoucissement pour aboutir aux produits finis. Dans les raffineries les plus simples, on s'en tient habituellement à la distillation atmosphérique et à la distillation sous vide, alors que, dans les raffineries intégrées, on procède au fractionnement, à la conversion, au traitement et au mélange, ainsi qu'à la production de lubrifiants, de fiouls lourds et de bitumes; ces raffineries peuvent aussi comporter des installations de traitement pétrochimique.

Le nombre et les types de procédés utilisés dans les raffineries modernes dépendent avant tout de la nature de la matière première brute et des exigences relatives aux produits finis. Ils sont aussi fonction de divers facteurs économiques: prix du brut, valeur des produits et accès à l'eau, à l'électricité, aux réseaux de transport, etc. L'ordre chronologique dans lequel les divers procédés ont été introduits est indiqué

## **2- Les opérations et les procédés de raffinage de base :**

Les opérations et les procédés de raffinage du pétrole peuvent être classés en quelques grandes catégories: séparation, conversion, traitement, formulation, mélange, opérations de raffinage auxiliaires et opérations de raffinage sans traitement. [7]

- 
- **Séparation:** Le pétrole brut EST séparé physiquement par fractionnement, dans des tours de distillation atmosphérique ET sous vide, en groupes d'hydrocarbures possédant différents intervalles d'ébullition, appelés «fractions» ou «coupes».
  - **Conversion :** Les procédés de conversion utilisés pour modifier la taille ou la structure des molécules d'hydrocarbures comprennent:
    - la décomposition (division) par hydrocraquage, craquage thermique et catalytique, cokéfaction et viscoréduction;
    - l'unification (combinaison) par alkylation et polymérisation;
    - l'altération par isomérisation et reformage catalytique;
    - le traitement.
  - **Traitement :** Depuis les débuts du raffinage, différentes méthodes de traitement ont été utilisées pour éliminer les composés non hydrocarbonés, les impuretés et les autres constituants qui peuvent nuire aux caractéristiques de performance des produits finis ou réduire l'efficacité des procédés de conversion. Le traitement comporte à la fois des réactions chimiques et une séparation physique, comme la dissolution, l'absorption ou la précipitation, faisant appel à une variété et à une combinaison de procédés. Les méthodes de traitement comprennent l'élimination ou la séparation des composés aromatiques et des naphthènes, ainsi que l'élimination des impuretés et des contaminants indésirables. On utilise des acides et des composés adoucissants pour désulfurer le pétrole brut avant le raffinage et pour traiter les produits durant et après le traitement. Parmi les autres méthodes, on peut citer le dessalage du brut, l'adoucissement chimique, le traitement à l'acide, le traitement à la terre par contact, l'hydrodésulfuration, le raffinage aux solvants, le lavage à la soude caustique, l'hydrotraitement, le séchage, l'extraction par solvants et le déparaffinage aux solvants. [7]
  - **Formulation et mélange:** consiste à mélanger et à combiner des fractions d'hydrocarbures, des additifs et d'autres composés pour obtenir des produits finis possédant des caractéristiques de performance spécifiques. [7]

- 
- **Opérations de raffinage auxiliaires :** Parmi les autres opérations de raffinage nécessaires lors du traitement des hydrocarbures, on compte la récupération des fractions légères, l'extraction des eaux acides, le traitement et le refroidissement des déchets solides, des eaux usées et des eaux de procédé, la production d'hydrogène, la récupération du soufre et le traitement des gaz acides et des gaz de queue. D'autres installations fournissent des catalyseurs, des réactifs, de la vapeur, de l'air, de l'azote, de l'oxygène, de l'hydrogène et des gaz combustibles.
  - **Opérations de raffinage sans traitement:** Toutes les raffineries ont une multitude d'installations, d'équipements et de systèmes qui sont indispensables aux opérations de traitement des hydrocarbures telles que la production de chaleur et d'électricité, le transport des produits, les réservoirs de stockage, l'expédition et la manutention, les torchères et les systèmes de décharge, les fours et les appareils de chauffage, les alarmes et les capteurs, l'échantillonnage, les essais et l'inspection. Parmi les installations ne servant pas au traitement figurent les dispositifs de lutte contre l'incendie, d'alimentation en eau et de protection, de réduction du bruit et de lutte contre la pollution, les laboratoires, les salles de commande, les entrepôts, les ateliers d'entretien et les bâtiments de l'administration. [7]

### **3- Les unités de production:**

Chaque installation de raffinage contient un procédé industriel. Des processus physiques ou chimiques simples sont généralement effectués.

Le nombre de types d'unités et de procédés utilisés dans l'industrie du raffinage est très important (environ 200). Ce nombre varie en fonction de la qualité des produits pétroliers et du pétrole brut utilisé et varie d'une raffinerie à l'autre.

Nous avons découvert ses différentes unités de production dans "**Raffinerie d'Adrar RA1D**"

#### **1. Unité de distillation atmosphérique :**

---

Cette unité est conçue pour traiter 600 000 tonnes de brut par an (sa capacité maximale est de 700 000 tonnes/an tandis que sa capacité minimale est de 420 000 tonnes/an).

Le **tableau** indique les principales spécifications du brut traité

Densité	0.834 g /l
Teneur en NaCl	8 mg /l
Teneur en Soufre	0.14 %
Acidité	0.04 mg KOH /g

**Tableau II-1** principale spécifications du pétrole brut traité

Au vu de ces spécifications, le brut traité est classé comme étant un brut aromatique à faible teneur en soufre.

## **2. Unité de craquage catalytique :**

Elle traite le résidu atmosphérique, sa capacité est de : 300 000 tonnes par an, elle produit les essences, le gasoil léger, les G.P.L, le slurry et les gaz incondensables.

## **3. Unité de reforming catalytique :**

- L'unité reforming catalytique est conçue pour traiter la charge naphta produite par l'unité distillation atmosphérique. Les produits de l'unité sont essentiellement du carburant sans plomb à haut indice d'octane : NO = 96 dénomme couramment : super sans plomb, des Gaz de Pétrole Liquéfié (L.P.G), du naphta léger (light naphta), naphta raffiné (refined naphta), des gaz incondensables (combustible pour fours de l'unité) et de l'hydrogène (pour réactions du processus). [8]

### **3.1 Principe :**

Le reformage catalytique est le processus d'aromatization et d'autres réactions se déroulant en présence de fractions de pétrole dans une certaine plage d'ébullition, effectuée par des catalyseurs de reformage dans un environnement d'hydrogène dans des conditions de température et de pression souhaitées. Le reformage

---

permet une petite quantité d'hydrocarbure aromatique dans la charge d'alimentation pour réarranger les structures moléculaires et par conséquent générer un alcane isomérisé riche en hydrocarbure aromatique. Il est ensuite traité pour obtenir des composants d'essence à haut indice d'octane. Les exigences générales pour le reformage de la charge d'alimentation sont les suivantes: l'alimentation de reformage idéale devrait avoir une teneur élevée en hydrocarbures aromatiques (ou un indice de reformage), alors que la matière de base naphénique est la matière première idéale pour l'unité de reformage. Les composants de fraction désirés pour donner de l'essence à indice d'octane élevé se situent dans la plage de 65 ° C à 180 ° C. [2]

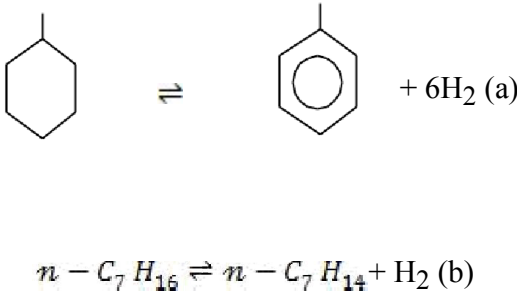
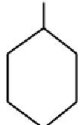
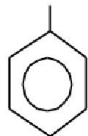
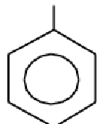
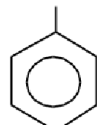
### **3.2 Principales réactions du reformage et caractéristiques physico-chimiques :**

#### **3.2.1 Nature des réactions mises en jeu dans le reformage :**

Les hydrocarbures à 7 atomes de carbone sont utilisés pour la production des essences automobile. Seules les paraffines et les oléfines très branchées ainsi que les aromatiques ont des valeurs de NOR et NOM satisfaisantes pour les essences actuelles.

Le reformage catalytique consiste en la production d'aromatiques à partir des naphènes et de paraffines en C<sub>7</sub> et en C<sub>9</sub> de manière aussi sélective que possible suite aux réactions suivantes.

- ✓ La déshydrogénation des naphènes (alkylcyclohexane) en aromatiques.
- ✓ Isomérisation- déshydrogénation des alkylcyclohexane.
- ✓ Isomérisation des paraffines.
- ✓ La déshydrocyclisation des paraffines.
- ✓ L'hydrocraquage des paraffines et des naphènes.
- ✓ La démétallation.
- ✓ Cokage des poly aromatique

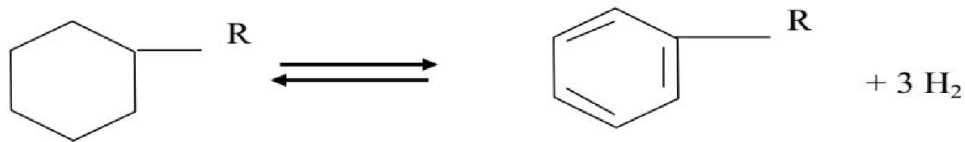
Réactions	Stœchiométrie	$\Delta H$ (KJ/mol)
Déshydrogénation	 $n - C_7 H_{16} \rightleftharpoons n - C_7 H_{14} + H_2 \text{ (b)}$	a)-209 b)-126
Isomérisation-déshydrogénation	<p>Alkyl cyclopentane <math>\rightleftharpoons</math>  <math>\rightleftharpoons</math> </p>	c)+15
Isomérisation des paraffines	$n - C_7 H_{16} \rightleftharpoons i - C_7 H_{16}$	d)+10
Déshydrocyclisation	$n - C_7 H_{16} \rightleftharpoons$  $i - C_7 H_{16} \rightleftharpoons$ 	e)-260

**Tableau II-2** principales réactions de reformage catalytique

La déshydrogénation des naphténes en aromatiques, cette réaction est fortement endothermique  $\Delta H > 200 \text{ KJ/mole}$ , elle est extrêmement rapide et favorisée par une

---

augmentation de température, une diminution de pression partielle d'hydrogène ou du rapport  $H_2 / HC$  et une augmentation du nombre de carbones.

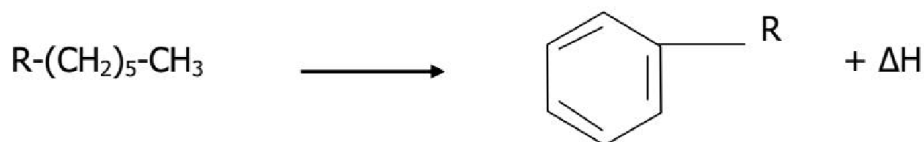


La déshydrogénation est activée par l'effet catalytique d'un métal (le platine), sa vitesse diminue avec l'augmentation du nombre de carbones, mais reste assez élevée par rapport aux autres vitesses. Cette réaction est très importante de par un indice d'octane très grand et une forte production d'hydrogène.

L'énergie d'activation de cette réaction est de l'ordre de 20Kcal.

- La déshydrocyclisation des paraffines:

Cette réaction est plus endothermique que la déshydrogénation ( $\Delta H > 250 KJ/mole$ ) elle est favorisée par l'augmentation du poids moléculaire des paraffines, une faible pression, une haute température et la présence de deux fonctions du catalyseur métal/acide.



La déshydrocyclisation des paraffines est la transformation d'une paraffine en naphène ; elle est encore plus endothermique et  $\Delta$  que la déshydrogénation ( $H = 250 KJ/mol$ ) et elle devient plus facile à provoquer avec l'augmentation du poids moléculaire de la paraffine.

- **L'isomérisation des naphènes:**

Cette réaction est faiblement exothermique ( $\Delta H = -10 \text{ à } -20 KJ/mole$ ).

Les alkyl cyclopentanes se transforment en alkyl cyclohexanes en présence d'un catalyseur acide (fonction acide).

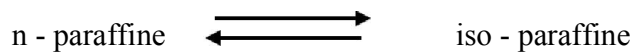
---

Les alkyl cyclohexanes se transforment à leur tour en alkyl aromatiques en subissant une déshydrogénation (augmentation d'indice d'octane).

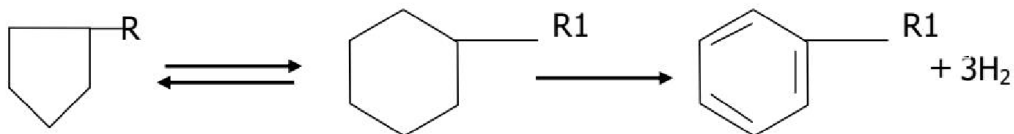
La réaction d'isomérisation des naphènes est un réarrangement du noyau.

➤ **L'isomérisation de paraffines:**

Cette réaction est provoquée par la fonction acide du catalyseur et se déroule rapidement, peu sensible à la température et insensible à la pression.



➤ **Déshydroisomérisation des Alkyl cyclopentanes**



Cette réaction est faiblement exothermique ( $\Delta H = -10$  à  $-20$  KJ/mol).

Les Alkyl cyclopentanes se transforment en alkyl cyclohexanes en présence d'un catalyseur (fonction acide) et dans les conditions de température et la pression du procédé.

Les alkyl cyclohexanes se transforment à leurs tours rapidement en alkyl aromatiques en subissant une déshydrogénation.

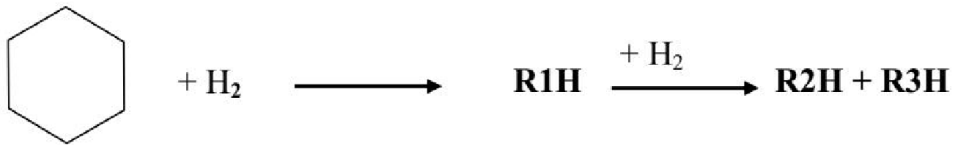
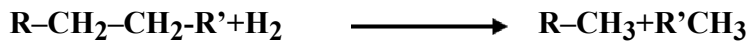
La réaction d'isomérisation des naphènes (Alkyl cyclopentanes) est un réarrangement de l'anneau.

➤ **L'hydrocraquage:**

Cette réaction est exothermique ( $\Delta H = -40$  KJ/mole), provoquée par la fonction acide du catalyseur, elle est relativement lente et favorisée par des



pressions et température élevées.



La disparition des paraffines, suite aux réactions de déshydrocyclisation et l'hydrocraquage, fait augmenter la teneur en aromatiques dans le mélange réactionnel, qui se traduit par une hausse du nombre d'octane, une diminution du rendement en plat format et une forte consommation d'hydrogène.

➤ **La formation du coke:**

Cette réaction résulte d'un craquage poussé dû à une haute température et une faible pression d'hydrogène. Cette une réaction parasite qui entraîne une désactivation rapide du catalyseur. Une haute pression d'hydrogène oriente la réaction vers l'hydrocraquage.

➤ **La déméallation:**

Ces réactions peuvent avoir lieu au cours de démarrage de l'unité car l'activité du catalyseur est grande (fonction métal).cette réaction peut être évitée par l'addition du soufre.



### 3.2.2 Principales réactions d'hydrotraitement

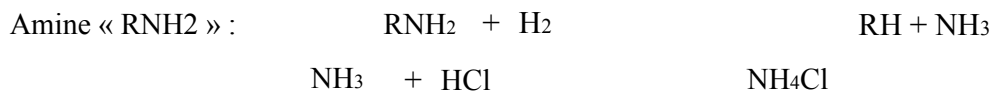
Au niveau du réacteur de prétraitement, des réactions d'hydrogénation ont lieu sur le site catalytique, ces principales réactions :

Désulfuration :

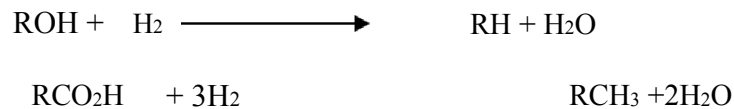


---

Dénitrification :



Hydrogénation des hydrocarbures oxygénés :



Hydrogénation des oléfines :

La pression partielle d'hydrogène aux conditions (T, P) du réacteur, permet la saturation des oléfines et des dioléfines sans toucher aux aromatiques.

Elimination des métaux :

Les métaux sont éliminés sous forme de dépôts sur le catalyseur, sans pour autant influencer son activité ; car il a été conçu pour supporter ces dépôts.

### 3.2.3 Thermodynamique et cinétique des réactions.

Les réactions qui produisent ( $\Delta H > 200 \text{Kj/mole}$ ), ainsi que la déshydrogénation des paraffines en oléfines ( $\Delta H > 100 \text{KJ/mole}$ ). Par contre, les réactions d'isomérisation de paraffines, de naphènes et d'aromatiques ne sont que légèrement exothermiques  $\Delta H = 10 \text{ à } 15 \text{Kj/mole}$ .

Toutes les réactions qui consomment de l'hydrogène sont fortement exothermiques, de même pour l'alkylation des aromatiques par les oléfines.

Toutes les réactions qui consomment de l'hydrogène, en donnant des molécules légères, sont totales jusqu'à  $600^\circ\text{C}$  et plus, Par contre, toutes les réactions recherchées dans le reforming sont équilibrés dans le domaine  $300 \text{ à } 600^\circ\text{C}$ .

L'augmentation de la température défavorise la formation des structures paraffiniques les plus ramifiées. De ce fait:

Les naphènes sont prépondérants à  $T > 500^\circ\text{C}$ .

---

Pour la déshydrogénation des paraffines, les variations de l'énergie libre  $\Delta G$  de réaction varient très peu lorsqu'on passe de  $C_6$  à  $C_9$ . La fraction molaire de l'heptènes à  $500^\circ C$  passe de 0.0035 à 0.07 lorsque la pression totale passe de 15 à 3 bars.

La déshydrogénation des naphènes est très influencée par la pression partielle d'hydrogène, à 40bar plus de 10% du cyclohexane restent présents à l'équilibre, alors qu'à 5 bars on obtient une conversion totale.

La déshydrocyclisation requiert des températures élevées ( $T > 450^\circ C$ ) et des pressions faibles ( $< 10\text{bar}$ ) pour convertir les paraffines.

### **3.2.4 Propriétés du catalyseur de reforming :**

Comme toute substance chimique active, le catalyseur a des facteurs de désactivation, à savoir :

❖ **L'Arsenic (As) :**

L'arsenic est la substance toxique la plus dangereuse pour les catalyseurs de reformage catalytique. Il a une grande affinité pour les métaux précieux dans le catalyseur. En interagissant avec le platine, il prive définitivement l'activité du platine et exproprie en conséquence l'activité du catalyseur de façon permanente. En outre, l'arsenic peut produire de  $AsCl_2$  avec du chlore, ce qui affaiblit les composants acides et détériore l'équilibre de la double fonction des catalyseurs. Le risque d'arsenic s'infiltrer le long des couches du lit catalytique avec une faible pénétration. En général, les catalyseurs dans le premier réacteur ont les teneurs les plus élevées en arsenic et dans le dernier réacteur les plus faibles.

Comme l'arsenic, les impuretés métalliques telles que le plomb, le cuivre, le mercure, le fer, etc., sont des substances toxiques permanentes, tandis que l'activité permanente du catalyseur ne peut pas être inversée par la régénération. Si des impuretés métalliques excessives sont présentes à long terme, cela peut provoquer un dépôt de sulfure de fer sur le dessus du réacteur de pré- hydrogénation et un accroissement de la pression de décharge du réacteur. Par conséquent, l'enlèvement du dépôt sur le dessus du réacteur est nécessaire chaque fois que le système est arrêté.

---

### ❖ **Les Sulfures**

Absorbé à la surface du catalyseur, le soufre, conjointement avec le platine et le rhénium, produit un composé pour détruire l'activité du catalyseur. Le soufre est une substance toxique temporaire, mais il possède une forte pénétration notoire, capable de nuire à plusieurs réacteurs à la fois.

L'empoisonnement au soufre peut être soulagé par la régénération et l'application d'une charge d'alimentation à faible teneur en soufre pour permettre aux catalyseurs de restaurer complètement ou partiellement leur activité. H<sub>2</sub>S se concentre habituellement dans le réservoir de reflux au-dessus des fractions supérieures de pré-hydrogénation et reformant la tour de déshydratation d'évaporation, la partie supérieure de la tour de début de reformation. Pendant le fonctionnement normal, une attention particulière doit être portée à la concentration de H<sub>2</sub>S dans l'hydrogène circulant de reformage, alors que pendant la période d'arrêt, l'auto combustion de FeS<sub>2</sub> doit être strictement concernée.

### ❖ **L'eau (H<sub>2</sub>O)**

La concentration d'eau dans les gaz dans le réacteur augmentera si la charge de reformage a une teneur élevée en eau. La température élevée du réacteur rend les grains de platine dans le catalyseur pour coaguler de plus en plus, entraînant une perte de chlore dans le catalyseur de reformage, diminuant le contenu acide du catalyseur et détruisant l'équilibre eau-chlore.

### ❖ **L'Azote (N<sub>2</sub>)**

Dans les conditions de reformage, l'azote dans le composé azoté organique peut réagir avec l'hydrogène pour générer du NH<sub>3</sub> qui est capable de neutraliser les composants acides dans les catalyseurs pour saboter les relations d'équilibrage entre la fonction catalytique du métal et la fonction d'acidité. La présence de NH<sub>3</sub> est préjudiciable à la sécurité de fonctionnement de l'équipement de reformage. L'agglomération de NH<sub>4</sub>Cl en quantité gigantesque peut entraîner un accroissement de la pression différentielle d'entrée-sortie du compresseur pour entraîner un déplacement si fréquent que la sécurité de fonctionnement du compresseur est sérieusement affectée. D'autre part, il s'agglomère en grand volume à l'unité de reformage de l'équipement d'échange de froid et à haute fraction de séparateur gaz-liquide, qui est susceptible de produire un blocage dans les pipelines.

---

### 3.3 Spécifications des performances de reformage catalytiques:

✓ **L'activité du catalyseur :**

L'activité est une spécification essentielle pour le reformage des catalyseurs. Plus le catalyseur est actif, plus la capacité de remplacement de la charge d'alimentation est élevée et plus la production est produite sur une période de réaction équivalente. Par conséquent, l'activité du catalyseur de reformage est souvent mesurée en taux de rendement en hydrocarbures aromatiques.

✓ **La sélectivité :**

La sélectivité se réfère au critère de capacité du catalyseur conduisant à la réaction idéale. Très souvent, le catalyseur déclenche une réaction secondaire tout en accélérant les réactions souhaitées.

✓ **La stabilité :**

L'activité du catalyseur et la sélectivité dans le cycle du processus seront affaiblies au fur et à mesure que le temps s'écoulera. Cette nature est représentée comme la stabilité du catalyseur, c'est-à-dire plus la valeur de la stabilité est faible, meilleure est la stabilité.

✓ **Durée de vie du catalyseur :**

Le nombre de mètres cubes de matières premières traitées par le catalyseur dans le cycle de traitement est appelé durée de vie du catalyseur. Avec le temps de traitement passé, l'activité du catalyseur diminue de plus en plus en raison du carbone décanté et de la contamination jusqu'à ce qu'elle ne soit plus utilisable et nécessite un remplacement par un nouveau catalyseur pour poursuivre le processus du reformage.

#### **Fonction métal du catalyseur :**

- **Le platine :**

Le platine est le centre d'activité du métal dans le catalyseur de reformage. Sa caractéristique la plus significative est la forte capacité à attirer des atomes d'hydrogène et en tant que telle, elle possède une propriété de catalyse pour la réaction d'isomérisation

---

de déshydrogénation. Le platine dans le catalyseur de reformage fonctionne principalement pour favoriser la déshydrogénation - hydrogénation.

Relativement plus de contenu de platine apportent plus de capacité antitoxique aux catalyseurs.

- **Fonctions du rhénium:**

Le rhénium doit augmenter la stabilité du catalyseur et empêcher les grains de platine de s'agglomérer. L'inclusion du rhénium permet d'augmenter de 3 à 4 fois la capacité de carbone du catalyseur à base de platine. La stabilité du catalyseur est donc augmentée, cependant, l'activité du catalyseur reste inchangée.

- **Fonctions eau et chlore:**

La présence d'eau-chlore est destinée à promouvoir les fonctions acides des catalyseurs nécessaires aux réactions d'isomérisation, de cyclisation et de craquage. La reformation de la fonction catalytique du métal (déshydrogénation) et la fonction acide sont inter-appariés et mutuellement effectuées. Par conséquent, il est plutôt essentiel de maintenir l'équilibre eau-chlore pour l'application complète des performances du catalyseur de reformage. Il est encore plus important pour l'unité de reformage avec des teneurs en hydrocarbures aromatiques dans la charge d'alimentation.

Une quantité excessive ou inadéquate de chlore (eau) est préjudiciable au catalyseur. L'injection de chlore provoque généralement une forte corrosion du chlore, la partie à basse température du système d'hydrogène ou le blocage du chlorure d'ammonium dans les unités en aval. Pour maintenir l'équilibre eau-chlore, la clé est le bon fonctionnement, l'injection régulière et continue sans fluctuation intense de l'injection. Au cours des opérations de démarrage et d'arrêt, il convient d'observer un plan d'injection de chlore rigoureux afin d'éviter le déversement de chlore ou de s'échapper, sinon cela pourrait entraîner une teneur en chlore insuffisante et affecter le fonctionnement optique du cycle global. De plus, les procédures d'injection de chlore en deux parties doivent être suivies en ce qui concerne le procédé de mélange à l'hydrogène en deux parties, sans remplacement mutuel admissible. [9]

### **3.4 Bilans massiques**

- **Bilan massique de l'unité reforming**

Designation		Rendement %	Données		
			kg/h	t/j	10 <sup>4</sup> t/a
Charge	Naphtha	100	14500	348	11.6
	Total	100	14500	348	11.6
Sortie	Fuel gas + loss	10.32	1496	35.904	1.20
	LPG	1.13	164	3.936	0.13
	Light naphtha	18.78	2723	65.352	2.19
	Stable gasoline	69.77	10117	242.808	8.09
	Total	100	14500	348	11.6

**Tableau II -3** Bilan de masses de l'unité de reformage catalytique

■ **Bilan de masse de la section préfractionnement**

Designation		Rendement %	Données		
			kg/h	t/j	10 <sup>4</sup> t/a
charge	Naphtha	100	14500	348	11.6
	Total	100	14500	348	11.6
Sortie	Light naphtha	16.69	2420	58.08	1.94
	Charge Prétraitement	83.38	12080	289.92	9.66
	Total	100	14500	348	11.6

**Tableau II -4** Bilan de masse de la section préfractionnement

■ **Bilan massique de la section prétraitement et la section reforming**

Designation		Rendement wt%	Données		
			kg/h	t/d	10 <sup>4</sup> t/a
Charge	Charge prétraitement	100.00	12,080	289.92	9.66

	Total	100.00	12,080	289.92	9.66
e f. io	Gaz riche en H <sub>2</sub> + pertes	12.38	1,496	35.904	1.20
	LPG	1.36	164	3.94	0.13
	Light naphtha	2.51	303	7.27	0.24
	Stable gasoline	83.75	10,117	242.808	8.09
	Total	100.00	12,080	289.92	9.66

**Tableau II -5** Bilan massique prétraitement et reforming

■ **Produits issus de l'unité de reformage catalytique :**

L'unité produit principalement des composants d'essence à indice d'octane élevé RON96, sous-produits de naphta léger, de gaz contenant de l'hydrogène et d'hydrocarbures liquides. Tous les produits sont livrés par des canalisations hors de l'unité. L'essence et le naphta léger sont envoyés au réservoir d'essence. Le naphta léger contenant de l'hydrogène généré au sommet de la tour d'évaporation est acheminé vers l'unité de craquage catalytique. Le GPL est pompé vers la section de fractionnement du gaz dans l'unité atmosphérique ou le réservoir de charge du fractionnement du gaz. Comme il n'y a pas d'installations d'hydrogénation dans la raffinerie, tous les sous-produits de l'hydrogène sont combinés dans les canalisations de gaz combustible de la raffinerie (le gaz de la tour d'évaporation pénètre dans l'unité de craquage catalytique avant la pénétration des gaz).

## 4- Conclusion :

La fonction de raffinage consiste à convertir le pétrole brut de diverses sources en un groupe de produits pétroliers répondant aux spécifications exactes et à rapprocher le plus possible le ratio de la demande du marché.

L'installation de raffinage est divisée en plusieurs unités en fonction des produits pétroliers extraits et de la qualité du pétrole brut



---

Le pétrole brut est transporté à travers ces unités jusqu'à ce qu'il atteigne son état final. Chacune de ces unités joue un rôle important dans le processus de raffinage.

L'unité de reformage catalytique est considérée comme l'une des unités les plus importantes de l'installation de raffinage.

L'unité de purification catalytique de la raffinerie d'Adrar est basée sur deux secteurs principaux: le prétraitement et le reformage. La première partie consiste à traiter le naphta dans une unité de distillation atmosphérique et la deuxième partie consiste à augmenter l'indice d'octane du naphta. Le processus consiste à reconfigurer la structure du naphta en une autre à l'aide de réactifs chimiques dans le réacteur. Il y a un catalyseur bimétallique sur le support acide.

Les produits sortant de l'unité sont principalement l'essence à l'indice d'octane élevé, du GPL et des gaz incondensables, qui sont ensuite injectés dans le réseau de gaz pour alimenter le four.



# **Chapitre III**

**Vérification et calcul du  
rendement du four F202-  
201 de l'unité reforming**

### I. Problématique :

Le four F 202 201 est considéré comme le cœur de l'unité reforming de la raffinerie d'Adrar Nous aborderons en détail le four F 202 201, ses composants, le matériau de sa fabrication, ainsi que ses propriétés distinctives, en plus de la quantité de consommation de carburant.

La question qui se pose : **Comment pouvons-nous améliorer le fonctionnement du four, optimisation sa consommation de carburant et augmenter son efficacité?**

Enfin, nous comparerons le fonctionnement du four avec le four H 101 Hassi Rmel.

### II. Conception :

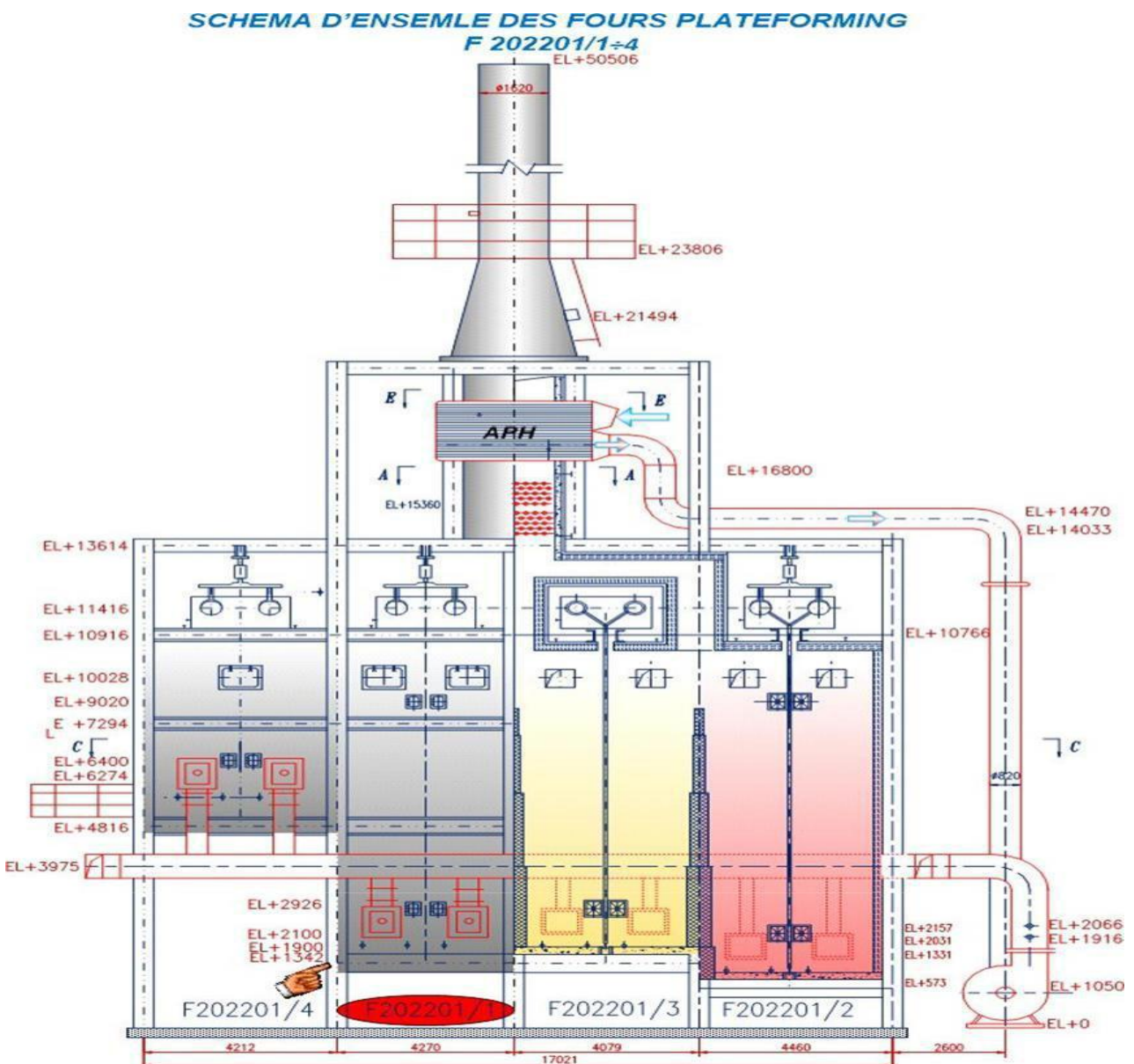


Figure III -1 schéma d'ensemble du four F202201

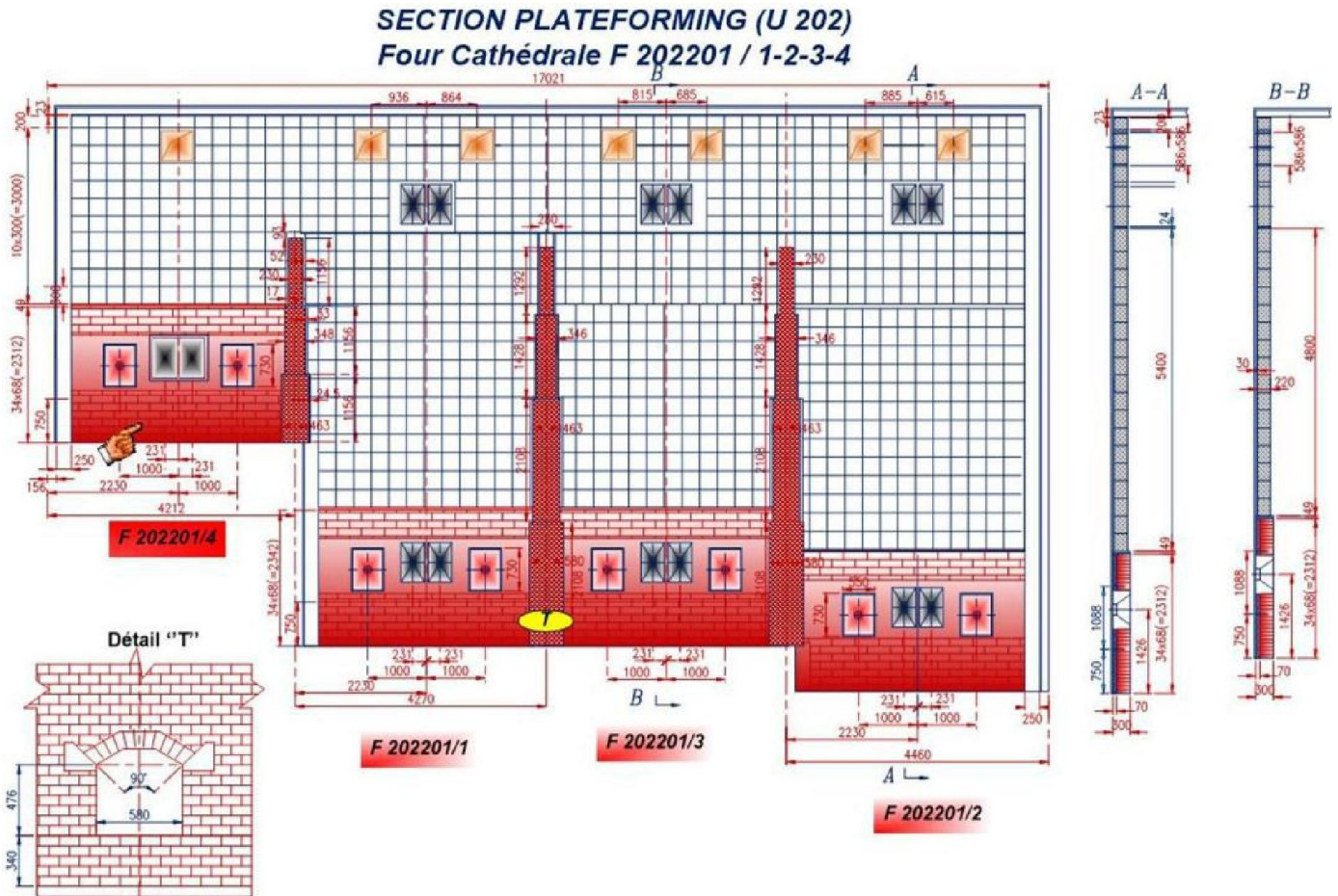


Figure III -2 schéma du four F202201 (intérieur)

### III. Caractéristiques du Four F202-201 :

Le four F202-201 est constitué d'une enveloppe métallique, ce four à 4 chambres, chaque chambre comporte :

- Une zone de radiation où les tubes verticaux sont directement exposés à la flamme et reçoivent la chaleur pour radiation
- Une zone de convection est installée à la sortie des fumées. Elle est constituée d'un faisceau de tubes placé perpendiculaire à la direction des fumées de façon à augmenter le coefficient d'échange.
- Un équipement de chauffage comprenant dans chaque chambre quatre brûleurs, ce qui fait de la somme totale dans les quatre chambres, seize brûleurs.

SERVICE : *Four de charge.*  
 UNITE : *U202.*  
 REPERE : *F202201/1*  
 DESIGN : *CNPC - CHINE*

TYPE : *Cathédral.*

PUISSANCE TOTALE (ABSORPTION) : *1.233MW.*

**IV. Rendement du Four F202-201 :**

Composition du gaz naturel :

Composition	Mol %
N <sub>2</sub>	2.51
CO <sub>2</sub>	8.05
CH <sub>4</sub>	85.92
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2.70
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.61
iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.07
nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.09
iC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.01
nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.03
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0.01
Total	100%

**Tableau III -1** composition du gaz naturel

**V. Calculs effectués :**

\* Calcul de la combustion

\* Calcul du rendement

**1- Calcul de la combustion**

Le calcul est basé sur l'équation stœchiométrique de la combustion des hydrocarbures ayant la formule généralisée  $C_nH_m$ , avec des excès d'air de 10%.

**2- Réactions de combustion :**



CH <sub>4</sub>	+	2	O <sub>2</sub>	→		CO <sub>2</sub>	+2 H <sub>2</sub> O
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	+	7/2	O <sub>2</sub>	→	2	CO <sub>2</sub>	+3 H <sub>2</sub> O
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	+	5	O <sub>2</sub>	→	3	CO <sub>2</sub>	+4 H <sub>2</sub> O
iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	+	13/2	O <sub>2</sub>	→	4	CO <sub>2</sub>	+5 H <sub>2</sub> O
nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	+	13/2	O <sub>2</sub>	→	4	CO <sub>2</sub>	+5 H <sub>2</sub> O
iC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	+	8	O <sub>2</sub>	→	5	CO <sub>2</sub>	+6 H <sub>2</sub> O
nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	+	8	O <sub>2</sub>	→	5	CO <sub>2</sub>	+6 H <sub>2</sub> O
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	+	19/2	O <sub>2</sub>	→	6	CO <sub>2</sub>	+7 H <sub>2</sub> O

**3- Quantité d'Oxygène nécessaire :**

$$N_{O_2} = (2 \times 0.8592) + (7/2 \times 0.0270) + (5 \times 0.0061) + (13/2 \times 0.0007) + (13/2 \times 0.0009) + (8 \times 0.0001) + (8 \times 0.0003) + (19/2 \times 0.0001)$$

<b><math>N_{O_2} = 1.85 \text{ Kmol/kmol gaz}</math></b>
--

La quantité pratique d'O<sub>2</sub> en tenant compte de l'excès d'air :

$$\alpha = 10 \% \text{ donc : } N_{O_2} = N_{O_2} + N_{O_2} \times \alpha$$

$$\boxed{\mathbf{NO_{2P} = 2.035 \text{ Kmol/kmol gaz}}}$$

**4- La quantité d'air nécessaire à la combustion :**

Comme la teneur de l'air en O<sub>2</sub> = 18%, alors la quantité d'air théorique est :

$$N_{air\ th} = NO_{2th} \times 100/18 = 1.85 \times 100/18$$

$$\mathbf{N_{air\ th} = 10.27 \text{ kmol/ kmolgaz}}$$

**5- La quantité pratique de l'air en tenant compte de l'excès d'air  $\alpha = 10\%$**

$$N_{air\ p} = 1 + \alpha \times N_{air\ th}$$

$$\mathbf{N_{air\ p} = 11.3 \text{ kmol/ kmolgaz}}$$

**6- Composition des fumés (quantité des produits de la combustion) :**

Quantité de CO<sub>2</sub> dégagée :

$$N_{CO_2} = 0.8592 + (2 \times 0.027) + (3 \times 0.0061) + (4 \times 0.0007) + (4 \times 0.0009) + (5 \times 0.0001) \\ + (5 \times 0.003 + 6 \times 0.0001)$$

$$\mathbf{N_{CO_2} = 0.9659 \text{ kmol/ kmolgaz}}$$

Quantité d'H<sub>2</sub>O dégagée :

$$N_{H_2O} = 2 \times 0.8592 + (3 \times 0.027) + (4 \times 0.0061) + (5 \times 0.0007) + (5 \times 0.0009) + (6 \times 0.0001) \\ + (5 \times 0.003 + 6 \times 0.0001)$$

$$\mathbf{N_{H_2O} = 1.8349 \text{ kmol/kmolgaz}}$$

En tenant compte de l'humidité de l'air, la quantité d'eau est alors :

$$N_{H_2O} = N_{air} \times P_{H_2O} / (P - P_{H_2O})$$

Avec :

$P_{H_2O}$  : la pression partielle de l'eau  
(72.358 mmHg). P : la pression  
atmosphérique (760 mmHg).

$N_{air}$  : quantité de l'eau contenue dans l'air (kmol).

$$N_{H_2O} = 10.25 \times 72.358 / (760 - 72.385)$$

$$N_{H_2O} = 1.079 \text{ kmol/kmolgaz}$$

Soit l'humidité relative de l'aire = 20 %

$$N'_{H_2O} = N_{H_2O} \times (20/100)$$

$$N'_{H_2O} = 0.2158 \text{ kmol/ kmolgaz}$$

La quantité d'H<sub>2</sub>O totale :

$$N_{H_2O \text{ totale}} = 1.8349 + 0.2158$$

$$N_{H_2O \text{ totale}} = 2.0507 \text{ kmol/kmolgaz}$$

La quantité de N<sub>2</sub> dans l'air :

$$N_{N_2} = 0.79 \times 11.30$$

$$N_{N_2} = 8.27 \text{ kmol/kmolgaz}$$

Quantité d'azote total :

$$N_{N_2 \text{ totale}} = N_{N_2 \text{ air}} + N_{N_2 \text{ gaz}} \quad N_{N_2 \text{ totale}} = 8.927 + 2.51$$

$$N_{N_2 \text{ totale}} = 9.437 \text{ kmol / kmolgaz}$$

## VI. Caractéristique des fumées :

Composant	PM(kg/kmol)	Quantité(kmol)	% vol	% Mol	Mi. Xi
CO <sub>2</sub>	44	0.9657	7.641	7.641	3.381
H <sub>2</sub> O	18	2.0507	16.226	16.226	2.921
N <sub>2</sub>	28	9.437	74.67	74.67	20.91



O2	32	0.185	1.46	1.46	0.47
Total		12.6384	100	100	27.6792

**Tableau III -2** caractéristique des fumées

**VII. Tableau de composition des fumées :**

combustible	%mol	O2 pour la combustion	Composition des fumées				Combustible
			CO2	H2O	O2	N2	
N <sub>2</sub>	2.51	---	---	---	---	2.51	N <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub>	8.05	---	8.05	---	---	---	CO <sub>2</sub>
CH <sub>4</sub>	85.92	171.84	85.92	171.84	---	---	CH <sub>4</sub>
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2.7	9.45	5.4	8.1	---	---	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
$\frac{C}{3} \frac{H}{8}$	0.61	3.05	1.83	2.44	---	---	$\frac{C}{3} \frac{H}{8}$
iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.07	0.0455	0.28	0.35	---	---	iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.09	0.0585	0.36	0.45	---	---	nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
iC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.01	0.08	0.05	0.06	---	---	iC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.03	0.24	0.15	0.18	---	---	nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0.01	0.095	0.06	0.12	---	---	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
Total	100	184.86	102.1	21.58	18.49	892.93	Air de combustion
Excès d'air		10%	102.1	205.12	18.49	892.93	Total
O2 pour la combustion		203.35	0.084	0.16	0.015	0.73	% mol
N2 air		892.7	<b>1218.46</b>				Nbr total des fumées pour 100 moles de combustible
Nbr de kmol d'air de combustion pour 100 moles de gaz combustible		1096.05					

**Tableau III -3** composition des fumées

**VIII. Calcul des spécifications des fumées et de gaz combustible :**

\* La masse molaire des fumées :

$$M_f = \sum M_i X_i$$

$$M_f = (44 \times 0.07641) + (18 \times 0.16226) + (28 \times 0.7467) + (32 \times 0.0146)$$

$$M_f = 27.679 \text{ kg / kmol}$$

\* La masse volumique des fumées :

$$\rho_f = M_f / 22.4$$

$$\rho_f = 1.23 \text{ kg / m}^3$$

Volume des fumées par combustion de 1Nm<sup>3</sup> de fuel gaz :

$$V_f = 1218.46 / 100 \quad V_f = 12.1846 \text{ Nm}^3$$

\* La masse moléculaire du gaz combustible :

$$M_{\text{gaz comb}} = (28 \times 0.0251) + (44 \times 0.0805) + (16 \times 0.8592) + (30 \times 0.027) \\ + (44 \times 0.0061) + (58 \times 0.0007) + (58 \times 0.0009) + (72 \times 0.0001) + (72 \times 0.0003) + (86 \times 0.0001)$$

$$M_{\text{gaz comb}} = 20.3724 \text{ kg / kmol}$$

\*La masse volumique du combustible aux conditions normales

$$\rho_{\text{gaz comb}} = M_{\text{gaz comb}} / 22.4$$

$$\rho_{\text{gaz comb}} = 0.91 \text{ kg / m}^3$$

\* La masse volumique de l'air :

$$\rho_{\text{air}} = 1.293 \text{ kg / m}^3$$

Débit d'air sec pour 1 kg de combustible :

$$L_s = 1.293 (N_{\text{air}} / \rho_{\text{gaz comb}})$$

$$L_s = 16.056 \text{ kg air / kg comb}$$

\*La quantité des fumées rapportées à 1 kg de gaz :

$$G_f = V_f \cdot (\rho_f / \rho_{\text{comb}})$$

$$G_f = 16.47 \text{ kg gaz / kg com}$$

**\* Pouvoir calorifique du gaz combustible :**

Le tableau ci-dessous représente le pouvoir calorifique des gazes :

Gaz	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	iC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
PCS	---	---	8859	15523	22101	28576	28644	35123	35190	41754

Tableau III -4 pouvoir calorifique du combustible

**\* Calcul du pouvoir calorifique inférieur du combustible :**

$$PCI = PCS - (10,9 \cdot N) \text{ avec } N : \text{ nombre de moles des molécules d'eau}$$

o Détermination de N :

$$\begin{aligned}
 1 \text{ mole de gaz} & \rightarrow 2,0512 \\
 \text{moles de H}_2\text{O } 22,4 \times 10^{-3} & \text{ moles de gaz} \\
 \rightarrow 2,0512 \text{ moles de H}_2\text{O } 1 \text{ Nm}^3 & \text{ de gaz} \\
 & \rightarrow N
 \end{aligned}$$

$$D'où : \quad N = 91,57 \text{ moles H}_2\text{O}$$

**\*Calcul du pouvoir calorifique supérieur moyen du combustible :**

$$PCS_{\text{moy}} = \Sigma (Y'_i \cdot PCS_i)$$

$$PCS_{\text{moy}} = 8229,66$$

$$\text{Donc :} \quad PCI = PCS_{\text{moy}} - 10,9 N$$

$$PCI = 7231,55 \text{ kcal / Nm}^3$$

**\*Pouvoir calorifique inférieur de 1 kg de combustible :**

$$Q_{\text{inf}} = PCI / \rho_{\text{gaz comb}}$$

$$Q_{\text{inf}} = 7946,75 \text{ kcal / Nm}^3$$

**IX. Calcul de vérification de rendement du four F202 201 :**

**1. Calcul de l'enthalpie des fumées :**

Composant	Yi	H (kcal / kmole)	H (Kcal / kg)
H2O	0.16	2457	136.45
N2	0.73	2094	74.78
O2	0.015	2094	65.43
CO2	0.084	2583	58.70

**Tableau III -5** Enthalpie des fumées

$$H_{\text{fumées}} = \sum H_i Y_i$$

$$H_{\text{fumées}} = (0.16 \times 136.45) + (0.73 \times 74.78) + (0.015 \times 65.43) + (0.084 \times$$

$$58.7) H_{\text{fumées}} = 104.16 \text{ kcal / kJ de fumées}$$

$$H_{\text{fumées}} = 104.16 \times G_f$$

$$H_{\text{fumées}} = 1715,52 \text{ kcal / kJ de combustible}$$

**2. Calcul du rendement actuel :**

$$\eta = 100 - (H_{\text{fumées}} / \text{PCI}) \times 100$$

$$\eta = 100 - (1715,52 / 7231,55) \times 100$$

$\eta = 76\%$
---------------

**X. Comparaison des données et de resultats entre le Four F202-201 (la raffinerie d'Adrar) et le Four H101 (Hassi R'mel) :**



Les données de départ:

Données de départ	H101	F202-201
$Q_{ch}$ ton/H	546	56
$T_{ch}$ °C	041	071
$T_{vap}$ %	61	01
$P_{ch}$ bar	05	05
$E_{air}$ %	51	01
$T_{air.com}$ °C	46	00
$HR$ %	46	71
$\eta$ %	76	51

**Tableau III -6** Les données de départ

Avec:

$Q_{ch}$ : Débit de la charge a chauffé

$T_{ch}$ : Température d'entrée de la charge

$T_{vap}$ : Taux de vaporization

$P_{ch}$ : Pression de la charge à l'entrée

$E_{air}$ : Excès d'air

$T_{air.com}$ : Température de l'air de combustion

$HR$ : Humidité relative de l'air

$\eta$ : Le rendement

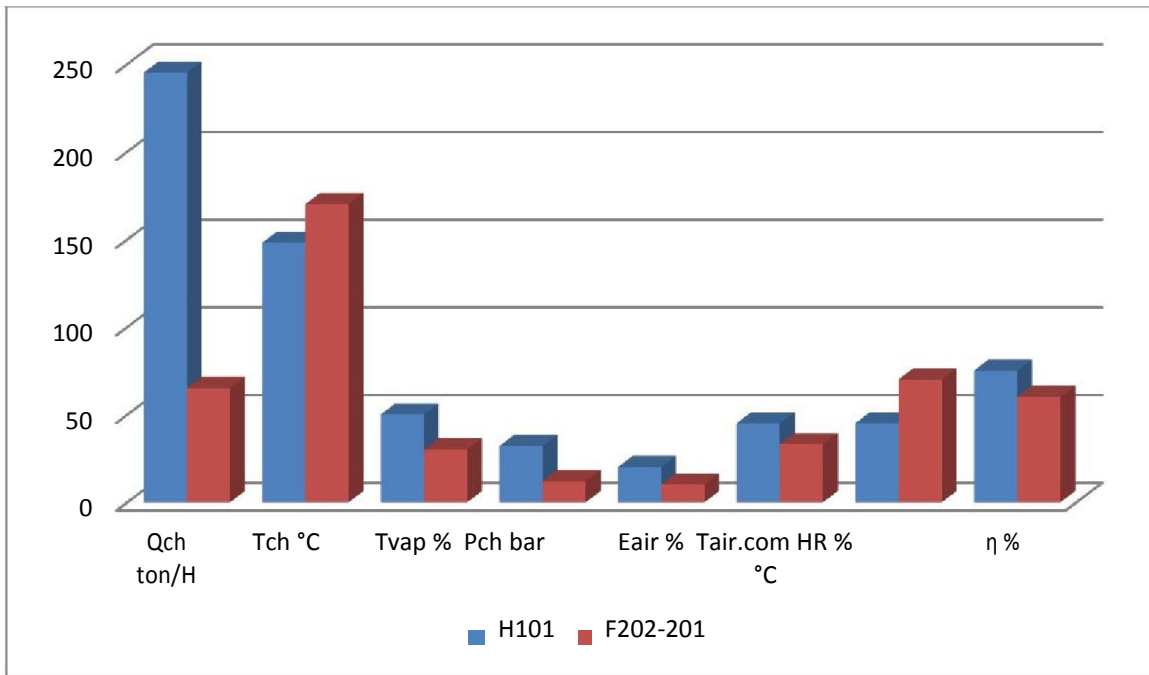


Figure III -3 Les données de départ

**Commentaire sur la figure:**

La première figure représente une comparaison de  $Q_{ch}$ ,  $T_{ch}$ ,  $T_{vap}$ ,  $P_{ch}$ ,  $E_{air}$ ,  $T_{air.com}$ , HR Pour le Four F202-201 et Le Four H 101, où nous notons cela. Le  $Q_{ch}$  pour H101 est très élevé, atteignant 250 tonnes / h alors qu'il atteint 50 tonnes / h dans le spot F202-201.  $T_{ch}$  sont proches à 150 ° C.

Presque comme  $T_{vap}$ ,  $P_{ch}$ ,  $E_{air}$  et  $T_{air.com}$  restent en dessous de 50%,  $T_{vap}$  est proche de 50%,  $T_{ch}$  atteint 50 bar et  $E_{air}$  est bien en dessous de 50%,  $T_{air.com}$  représente environ 50% de ce qui reste. HR et chacun d'eux dépasse 50%.



La Quantité d'oxygène (O<sub>2</sub>) nécessaire à la combustion :

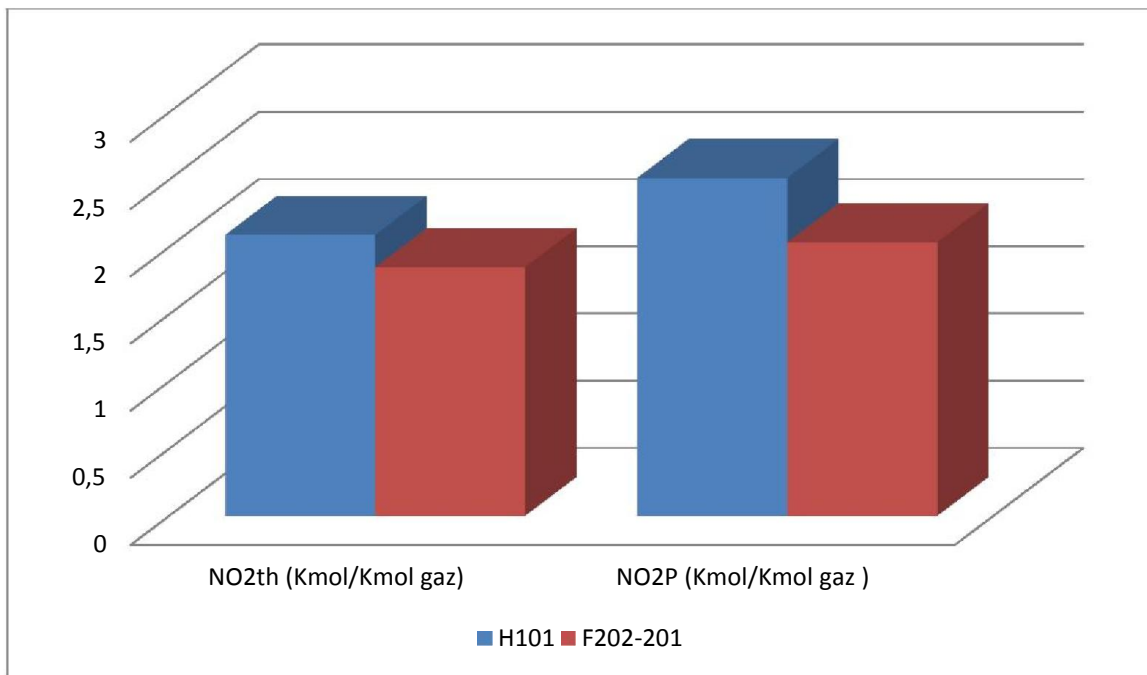
La Quantité d'oxygène	H101	F202-201
NO <sub>2</sub> th (Kmol/Kmol gaz)	2.09	1.85
NO <sub>2</sub> P (Kmol/Kmol gaz )	2.513	2.035

Tableau III -7 La Quantité d'oxygène (O<sub>2</sub>) nécessaire à la combustion

Avec :

NO<sub>2</sub>th: La quantité théorique de O<sub>2</sub> en tenant compte l'excès d'air

NO<sub>2</sub>P: La quantité pratique de O<sub>2</sub> en tenant compte l'excès d'air



**Figure III -4** La Quantité d'oxygène (O<sub>2</sub>) nécessaire à la combustion

**Commentaire sur la figure:**

Le deuxième figure représente la quantité de chaleur théorique et appliquée à la fois pour le spot. **F202-201** et **H101**, où nous trouvons que la quantité de chaleur théorique et appliquée de Four **H101** est supérieure à la température théorique et appliquée de Four **F202-201**.

❖ La Quantité d'air nécessaire à la combustion:

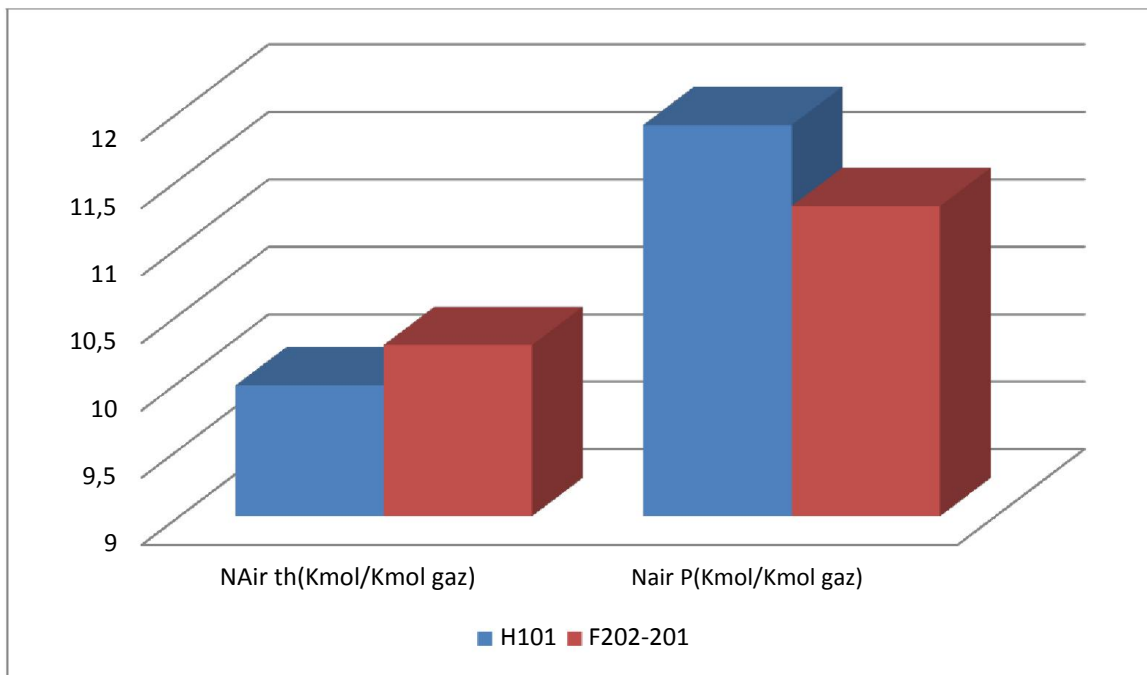
La Quantité d'air	H101	F202-201
N <sub>Air th</sub> (Kmol/Kmol gaz)	9,9754	10.27
N <sub>air P</sub> (Kmol/Kmol gaz)	11,9705	11.3

**Tableau III -8** La Quantité d'air nécessaire à la combustion

Avec :

N<sub>O2th</sub>: La quantité théorique de l'air en tenant compte de l'excès d'air

N<sub>air P</sub>: La quantité pratique de l'air en tenant compte de l'excès d'air



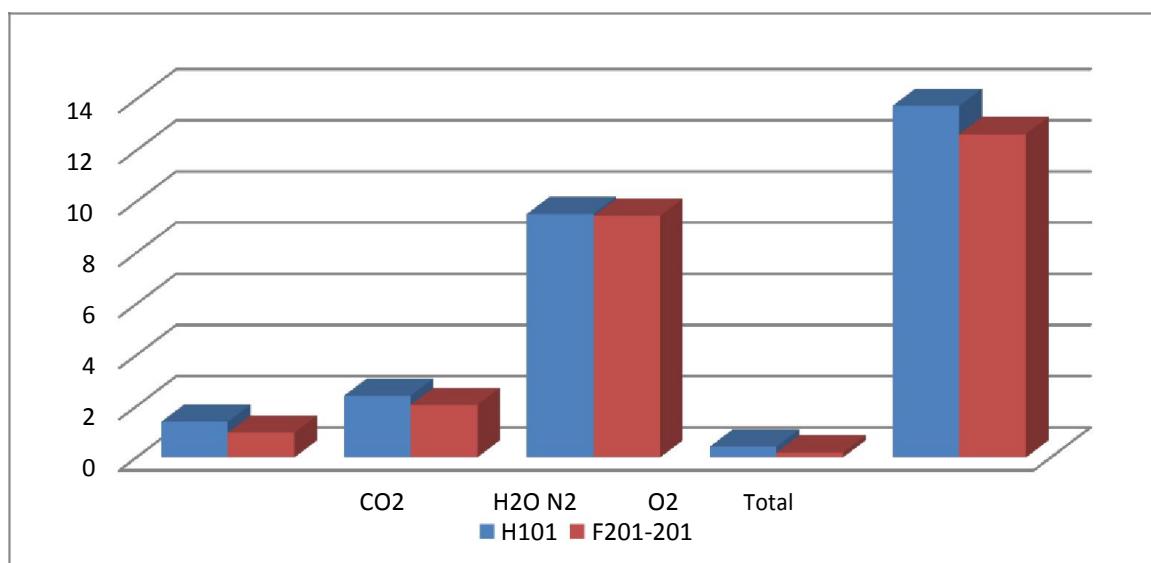
**Figure III -5** La Quantité d'air nécessaire à la combustion



Caractéristique des fumées :

Composant (kmol)	H101	F201-201
CO <sub>2</sub>	1.3932	0.9657
H <sub>2</sub> O	2.4117	2.0507
N <sub>2</sub>	9.5179	9.437
O <sub>2</sub>	0.4189	0.185
Total	13.7414	12.6384

**Tableau III -9** Caractéristique des fumées



**Figure III -6** Caractéristique des fumes





Les quantités des produits de la combustion (Composition des fumées):

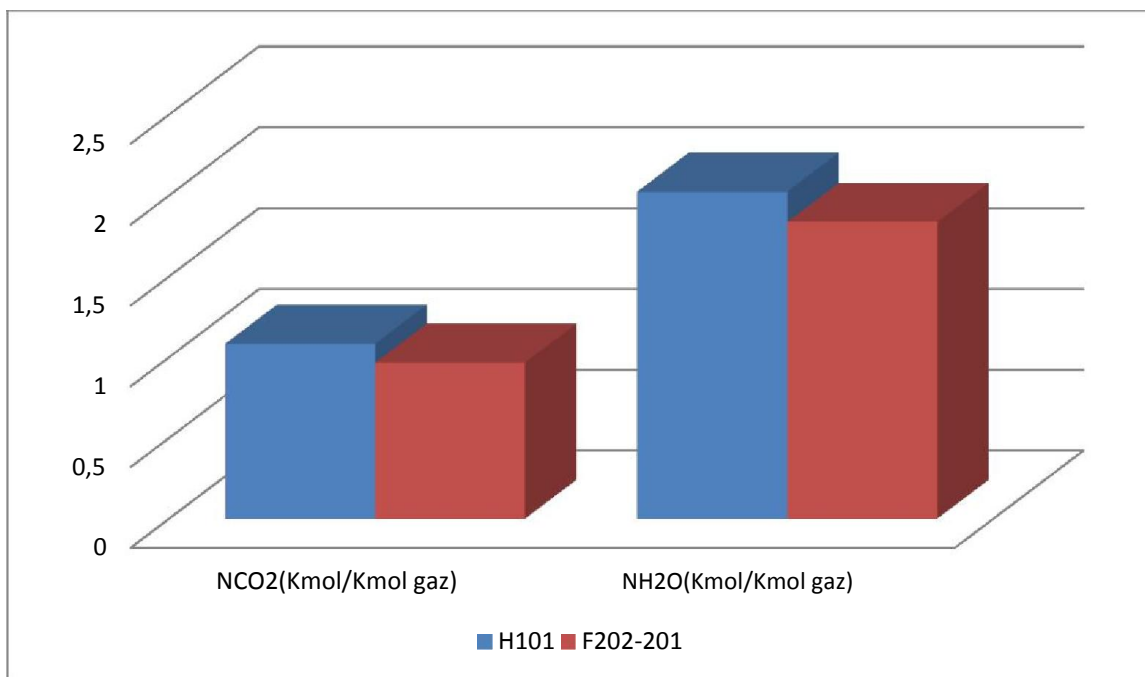
Composition des fumés	H101	F202-201
NCO <sub>2</sub> (Kmol/Kmol gaz)	1.0832	0.9659
NH <sub>2</sub> O(Kmol/Kmol gaz)	2.0233	1.8349

**Tableau III -10** Les quantités des produits de la combustion

Avec :

NCO<sub>2</sub>: La quantité dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dégagé

NH<sub>2</sub>O: La quantité d'eau (H<sub>2</sub>O) dégagé



**Figure III -7** Composition des fumés

**Commentaire sur la figure:**

Colonnes de comparaison des produits de combustion H<sub>2</sub>O et Co<sub>2</sub> pour le four **F202-201** et Four **H101**: On peut dire qu'il n'y a pas de différence significative entre eux dans les produits de combustion, car ils sont proches dans la quantité de Co<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>o produit, mais le four H101 a une légère ou petite augmentation de la quantite de produits de combustion.



les spécifications des fumées et de gaz combustible:

Les variables	H101	F202-201
M <sub>f</sub> (Kg/Kmol)	27.989	27.679
ρ <sub>f</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )	1.24	1.23
V <sub>f</sub> (Nm <sup>3</sup> )	13.9738	12.1846
M <sub>gaz comb</sub> (Kg/Kmol)	18.8222	20.3724
ρ <sub>com</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )	0.78	0.91

$L_S$ (Kg/Kg comb )	19.745	16.056
$G_f$ (Kg fumée s / Kg comb)	22.26	16.47

**Tableau III -11** les spécifications des fumées et de gaz combustible

Avec :

$M_f$ : La masse molaire des fumées

$\rho_f$ : La masse volumique des fumées

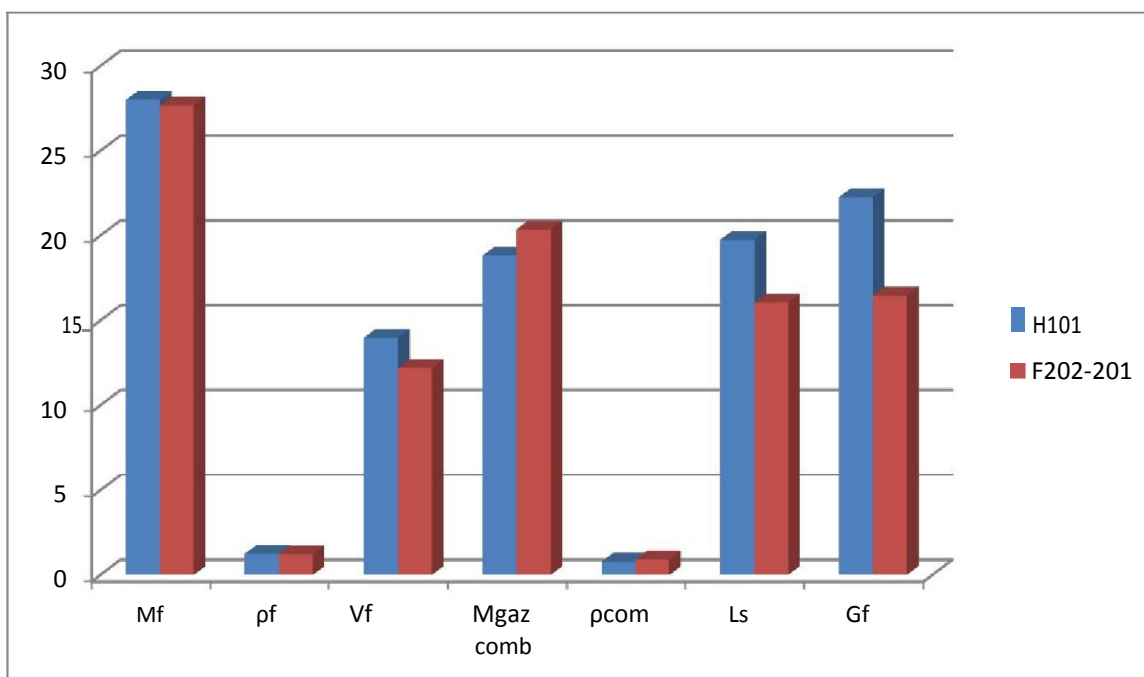
$V_f$ : Volume des fumées formées par la combustion

$M_{\text{gaz comb}}$ : La masse moléculaire de gaz combustible

$\rho_{\text{com}}$ : La masse volumique de combustible

$L_s$ : Le débit d'air sec

$G_f$ : La quantité des fumées rapportée



**Figure III -8** les spécifications des fumées et de gaz combustible

**Commentaire sur la figure:**

Les colonnes représentent la comparaison: les spécification des fumées et de gaz combustible . Pour le Four H101 et F202-201. Où il y a uniformité et égale dans la masse molaire et la masse volumétrique de la fumée. Ainsi que la masse volumétrique de combustion. Le rendement  $v_f$  à la combustion de la four H101 est beaucoup plus important par rapport au volume de fumée produite par le four F202-201. La masse partielle du gaz de combustion  $M_{\text{gaz}}$  de four 201 - F202 est supérieure à la masse partielle du gaz de combustion de Four H101. Ainsi que le flux d'air séché.  $L_s$  et la quantité de fumée.  $G_f$  pour le four H101 est beaucoup plus important que le débit d'air séché et la quantité de fumée au four F202-201.



Pouvoir calorifique du gaz combustible et le rendement:

Les variables	H101	F202-201
PCS(Kcal/Nm <sup>3</sup> )	9278.31	8229.66
PCI(Kcal/Nm <sup>3</sup> )	7845.25	7231.55
η %	75	76

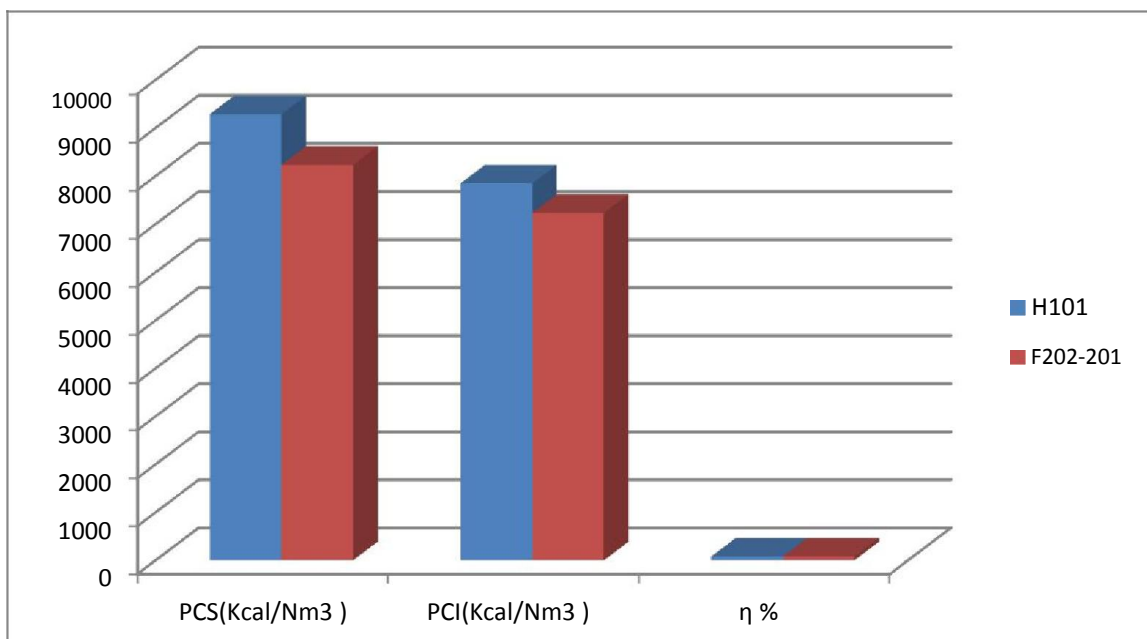
**Tableau III -12** Pouvoir calorifique du gaz combustible et le rendement

Avec :

PCS: pouvoir calorifique supérieur du combustible

PCI: pouvoir calorifique inférieur du combustible

η: Le rendement



**Figure III -9** Pouvoir calorifique du gaz combustible et le rendement

**Commentaire sur la figure:**

Le derniers figure représentent la comparaison PSS etPSI. Et la rentabilité. Pour les deux Four **H101**. Et le Four **F202-201**, on constate que le PSS du Fur H101 varie énormément, et sa valeur atteint 9000kcal / Nm<sup>3</sup>. Quant au Fur F202-201, il atteint presque 8000kcal / Nm<sup>3</sup>. Quant au PSI, il n'y a pas différence significative entre eux, atteignant la valeur Nm<sup>3</sup> / 7000kcal. Le rendement est quasi inexistant.

**XI. Recommendation :**

Pour une optimisation de la consommation du fuel gaz toujours, il existe autre méthodes possibles qui peut être réalisé à l'aide des modifications des paramètres bien déterminer de four, qui conduise a amélioré le rendement de ce four.

Cette possibilité d'amélioration du rendement du four est limitée et qui se repose sur la réduction des pertes :

### 1- 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 3%**); l'intérêt de cette solution est relativement limites.

### 2- Réduction des pertes des fumées :

#### 2-1. Réduction 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; mais tout en gardant une limite bien stricte de cette réduction.

Cette dernière peut toute fois être obtenue :

- En utilisant des brûleurs soignés réalisant un bon mélange de l'air et de combustion en

particulier par la turbulence de l'écoulement imposé à l'air, celui étant nécessairement admis sous pression.

- En utilisant de l'air chaud préchauffée qui favorise la combustion.

En fin, si la température de rejet des fumées est basse, la recherche de la combustion à bas excès d'aire présent un intérêt limite.

#### 2-2. Abaissant la température des fumées :

C'est le moyen plus efficace d'amélioration du rendement du four.

Il est remarqué que un abaissement de la température des fumées de **20°C** à la sortie aux cheminé correspond un gain de rendement de l'ordre de **1%**.

Cet abaissement de température des fumées peut être réalisé en modifiant la position des registres des cheminés de four.

Par conséquent en peut trouver une fonction liant le débit du combustible (**B=GG**) avec le rendement du four.

D'après l'équation :  $GG = Q_{abs} / \eta \cdot PCI$

Tout en supposant que :  $Q_{abs} / PCI = Cst$

Pour cela on a :  $A = Cst = Q_{abs} / PCI$

Donc :

$GG = A \cdot (1/\eta)$
-------------------------

$$Y = G_c$$

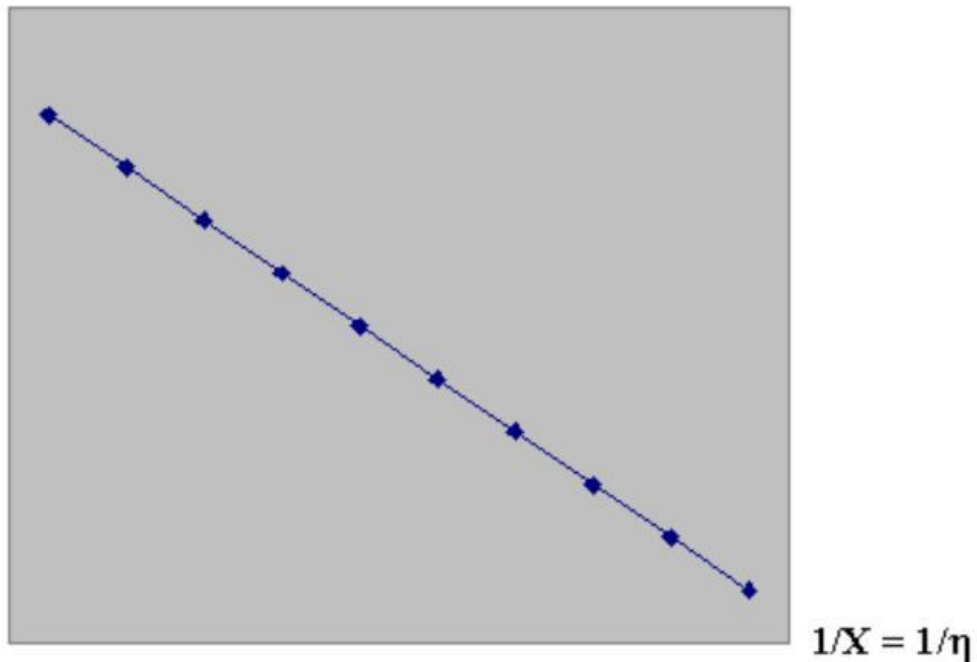


Figure III -10 La variation de débit de combustible en fonction de rendement

### 2-3. Amélioration du PCI du gaz combustible :

On peut augmenter le PCI du fuel gaz par changement de sa nature (la composition), en mélange le fuel gaz initial avec un autre fuel gaz provient de d'autre origine.

Et on trouve :

$$Q_{Initial} = PCS_{Initial} \cdot G_{Initial}$$

$$Q_{Ajouté} = PCS_{Ajouté} \cdot G_{Ajouté}$$

$$Q_{Fuelgaz} = PCS_{Fuelgaz} \cdot G_{Fuelgaz}$$

Donc :  $Q_{Fuelgaz} = Q_{Initial} + Q_{Ajouté}$

$$PCS_{Fuelgaz} \cdot G_{Fuelgaz} = PCS_{Initial} \cdot G_{Initial} + PCS_{Ajouté} \cdot G_{Ajouté}$$

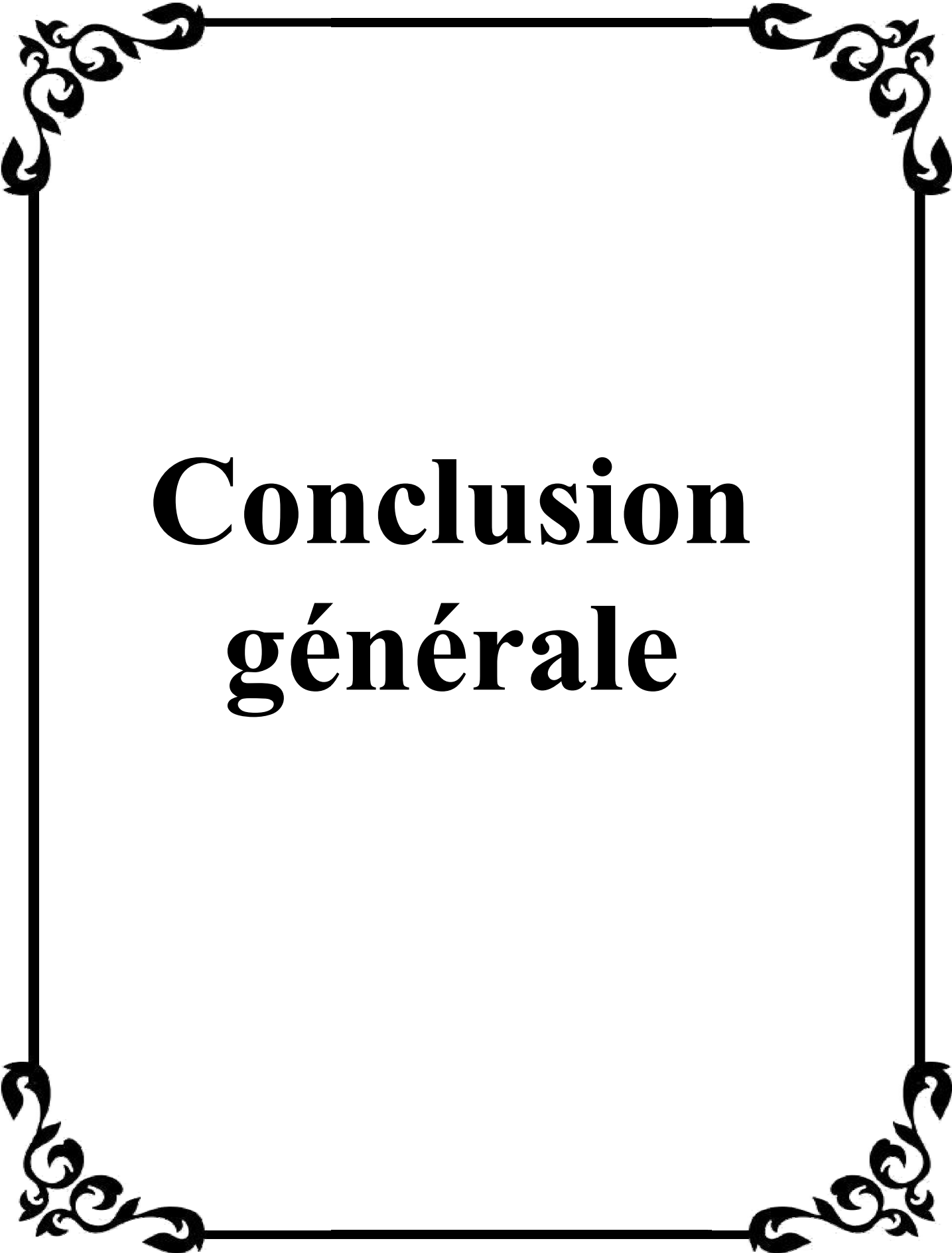
## **XII. Conclusion:**

Afin de connaître le fonctionnement du four **F202-201** nous avons étudié les composants de ce Four, sa formation interne et externe à travers des plans d'ingénierie détaillés.

En plus d'étudier les différentes interactions qui se produisent en son sein, avec le calcul de l'efficacité et du rendement afin d'améliorer la rentabilité

Nous avons également évalué ce four avec le four **H101** en termes de forme et d'efficacité, en comparant les interactions à l'intérieur de chaque four, le combustible consommé, et les problèmes rencontrés par chaque four.

Après la comparaison, nous avons présenté quelques astuces qui permettent d'améliorer la consommation de carburant du four dans le four **F202-201**.



# **Conclusion générale**

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale :

Le contrôle et le commande des dépenses et les coût de production et l'exploitation dans toute industrie c'est l'objectif de toute société industriel, pour cela Sonatrach depuis sa création et l'installation de ces unités de traitement de gaz, elle intéresse beaucoup de maîtriser et d'optimiser ces dépenses et minimiser le plus possible les coût d'exploitation particulièrement dans ces derniers années surtout avec la nouvel stratégie de l'état dans le domaine d'hydrocarbures .

L'objectif de cette étude théorique était donner un idée général sur le fonctionnement du four F202-201. En plus de connaitre les rôles les plus importantes du four et les fonctionnalités, outre les réaction chimiques qui se déroulent à l'intérieur .

Le carburant qui utilisé donne se four ainsi que les opération de raffinage de base et bilatérales les plus importantes qui peuvent être effectuées immédiatement .

La saisine a également été faite aux unités de la raffinerie de pétrole d'Adrar ,ainsi qu' aux produit extraits après le processus de raffinage .

nous avons fourni les plans d'ingénierie en détaille et la structure de composants de four F202-201. Certaines données et résultats préliminaires pour le four F202-201 ont été comparés avec four H101 de hassi Ramel utilisant des graphiques des colonnes .

En fin les problèmes les plus important sont ce dont il souffre et solution qui proposé . En plus de calcule la rentabilité et l'efficacité de four F202-201,et comment améliorer la rentabilité .

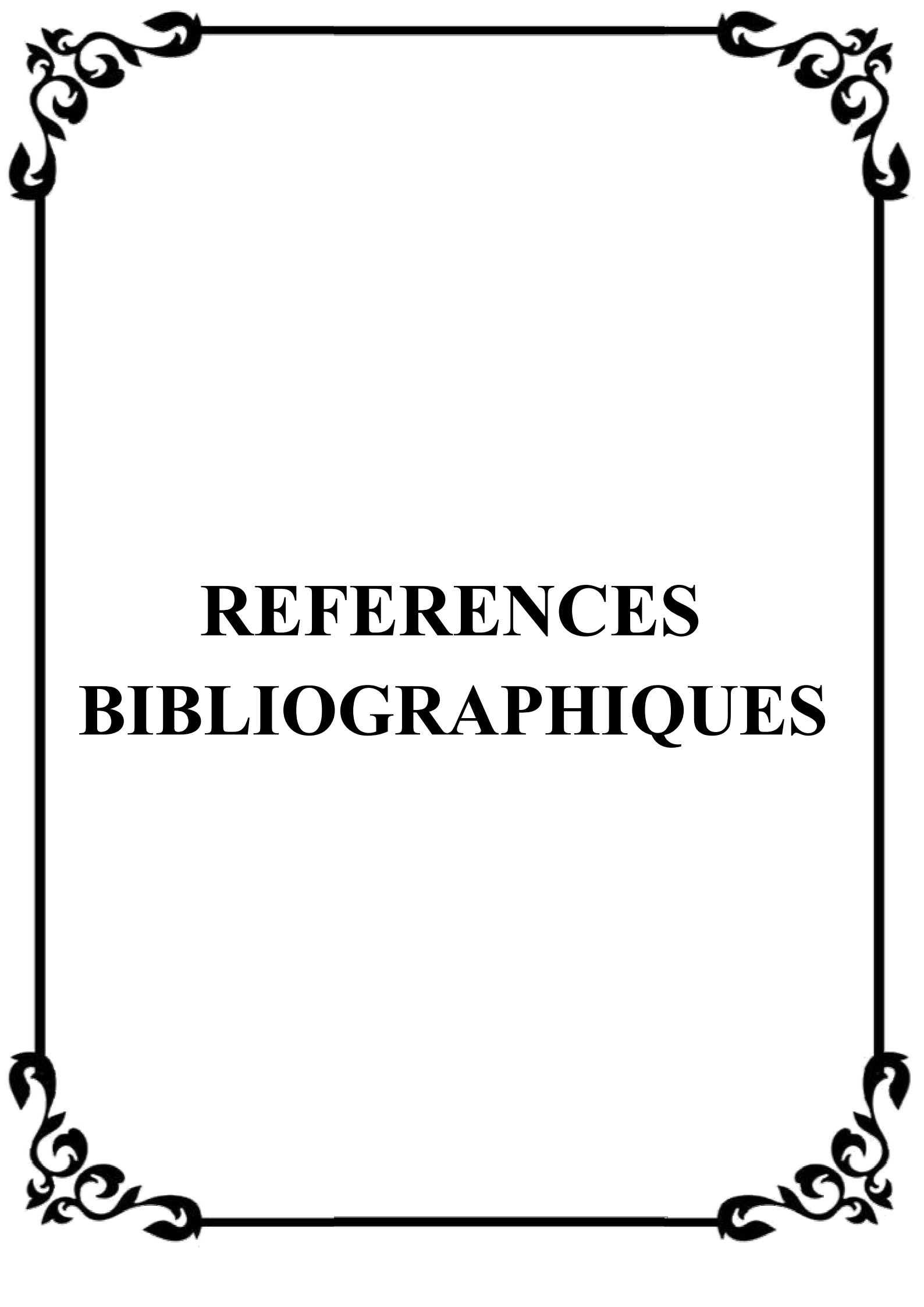
Ce qui peut être ajouté ce sont quelques recommandation pour une optimisation de la consommation du fuel gaz.

- 1- Réduction des pertes aux parois
- 2- Réduction des pertes des fumées
- 3- Amélioration du PCI du gaz combustible(en mélange le fuel gaz initial avec un autre fuel gaz provient de d'autre origine).

A la fin on espère que ce modeste travail être suffisant pour atteint son objectif et on souhait de le voir poursuive réalisé dans d'autre unités.

---





**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BOUBAAYA Hassen, KHAREF Hocine, Caractérisation des paramètres de combustion d'un four industriel : cas de cimenterie de Hammam Dhalaa à M'sila, 2017
- [2] M : Dif Eybek, Etude du four F202-201 de l'unité de reformage catalytique de la raffinerie d'Adrar RAID, Ecole de Boumerdès, Projet professionnel de fin de formation
- [3] Revue SONATRACH, gaz en Algérie, 22 P [1,6]
- [4] Isidore JACUBOWIEZ, Fours industriels, Ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers Ingénieur Conseil en énergie et environnement au groupe Elf Aquitaine et à l'Association Technique Énergie Environnement (ATEE)
- [5] Mohamed Ould Sidi Mohamed, Hammi Youcef, Optimization de la consommation du fuel gaz au niveau de four H102 du module MPP IV de Hassi r'mel par simulateur HYSIS, 2015
- [6] Vincent Bronet, Amélioration de la performance industrielle à partir d'un processus
- [7] Richard S. Kraus, Chapitre 78 - Le raffinage du pétrole, 1998
- [8] Y.DALIL, GPL Technique et Problématique/ Raffinerie de SBAA (Adrar) ; 2013
- [9] Catalytic reforming unit processing technical manual, 2005
- [10] W. SILABDI, Production d'hydrogène, 2017
- [11] Généralités sur les fours de raffinage ; ENSPM, formation SAMIR
- [12] A.BEN AHMED & M. TOUIKER, Fours et Chaudières; SONATRACH IAP/Skikda