N° Ordre...../DGM/FT/UMBB/2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en **:**

Filière : GENIE MÉCANIQUE
Spécialité : ÉNERGÉTIQUE

THEME

ÉTUDE ET AMÉLIORATION DU FOUR F501 DE LA RAFFINERIE D'ALGER

Présenté par :

MEGLALI MOHAMED EL AMINE

SOUIAH RAMZI REDA

Promoteur : M^me^ GUEMMADI

Encadreur : M^me^ LOULOU

Promotion 2021- 2022

Remerciements

Tout cours de combustion qui se respecte contiendra le fameux concept de triangle du feu. Ce dernier précise que toute combustion nécessite une énergie d'activation, un combustible et un comburant et afin de dégager par la suite de l'énergie. Il en va de même pour ce travail qui n'aurait pu être réalisé sans la présence et la personnalité de trois personnes que je tiens à remercier très sincèrement

➡ *Au nom d'Allah, le Tout-Miséricordieux, le Très-Miséricordieux. Louange à Allah Seigneur de l'univers.*

Que la Prière et le Salut soient sur le plus noble Serviteur et Messager d'Allah, Muhammad,

➡ *A nous parents qui sont le symbole de l'espoir*

➡ *Aux enseignant, promotrice et encadreur pour toute les sacrifices consentis et ses précieux conseils*

Dédicace

Au nom d'Allah, le Tout-Miséricordieux, le Très-Miséricordieux. Louange à Allah Seigneur de l'univers.
Que la Prière et le Salut soient sur le plus noble Serviteur et Messager d'Allah, Muhammad, sa famille et ses compagnons
Je dédie ce modeste travail à ceux qui ont consacré leurs vie à ma réussite pour toutes leurs tendresses, leurs sacrifices et leurs éfforts consentis à mon éducation et ma formation et qui n'ont d'égal que le témoignage de la profonde reconnaissance, les deux les plus chèrs au monde :
Mon père Amer pour son encouragement et ma mère khedoudja pour sa patience.
A mes très chères sœurs, Radia et Rahima ; Linda et son maris kader sans oublier leurs enfants chemssedine ; aya et mon ange maria
A mon frères Saide et sa femme et l ange melissa
A mon adorable frère qui est dans un monde meilleur (Hakim رحمه الله و اسكنه فسيح جنانه**.)**
A mon frère et ami choki (khellil la pagaille) et sa maman qui est ma deuxième maman fadela
A mes tantes et oncles, en particulier tata zola. A ma cher cousine tata zakia qui m'a toujours soutenu et ses enfants en particulier amine et sarah pour leurs encouragements.
A mes chères amies que j'adore, pour toutes nos joies et nos peines que nous avons partagées que notre amitié puisse incha'allah durer : Karim diff et ses chers parent,Mohamed el amin , Maoudj amine ,Nabil hadj RabiaetAzdinbekhat.
A tous mes camarades de la promotion 2021-2022 .
Et a tout le monde qui m a soutenu de loin ou de prés .

SOUIAH Ramzi Reda

Signature

Dedicase

Je dédie ce travail … A ma mère, qui a ouvre pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude. A mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutient permanent venu de toi. A mes chers frères Walid et Abdel Haq, pour leur appui et leur encouragement, A mes chers amis Ramzi, Karim, Abd El kader, youssouf, akram, hichem et lokman A mes oncles, tantes, cousins et cousines. Vous avez de près ou de loin contribué à ma formation. Affectueuse reconnaissance.

Meglali Mohamed El Amine

Table des matières

Introduction générale....1

Chapitre I : Présentation de la raffinerie d'Alger

I.1. Introduction 3
I.2. Présentation de la raffinerie....4
I.3. Situation géographique de la raffinerie 4
I.4. Historique de la raffinerie....4
I.5. Capacité de production.... 5
I.6. Description des principales installations 5
I.6.1. Unité de topping U100 : unité de distillation atmospherique 6
I.6.2. Unité 200 : unité de plateforming (reforming catalytique) 8
I.6.3. Unité 300 : unité gaz plant (traitement et separation) 8
I.6.4. Salle de contrôle.... 9
I.6.5. Parc de stockage.... 9
I.6.6. La pomperie 10
I.6.7. Les mélanges.... 12
I.6.8. Laboratoire.... 12
I.6.9. Les utilités.... 12
I.6.10. Atelier de maintenance 13
I.7 Nouvelles installation et réhabilitations de la raffinerie d'Alger 14
I.8. Objectifs du programme de réhabilitation et d'adaptation 15

Chapitre II : Généralités sur les fours pétroliers

II.1. Introduction.... 16
II.2. Fonction d'un four 16
II.3. Description d'un four 18
II.4. Bruleurs.... 19
II.5. Types de bruleurs 19
II.6. Principaux types des fours 20
II.7. Principaux critères de choix d'un four 27
II.8. Constitution d'un four 27
II.9. Garnissage des parois du four 29
II.10. Type de garnissage 29
II.11. Description du four F501....32
II.12. Géométrie du four.... 33

Chapitre III : Calcul et amélioration du rendement d'un four

III.1. Introduction.... 34
III.2. Généralités sur la combustion.... 34
III.3. Réactions de combustion.... 34
III.4. Composition théorique des fumées 35
III.5. Teneur théorique en produits agressifs 36
III.6. Polluants émis par les fours.... 36

III.7. Chaleur de réaction 37
III.8. Le pouvoir calorifique 37
III.9. Pouvoir calorifique d'un mélange 38
III.10. Pouvoir comburivore 38
III.11. Les différents types de la combustion 40
III.12. Les combustibles 40
III.13. Conditions nécessaires à la combustion 41
III.14. Echanges thermiques dans les zones du four 42
III.15. Rendement du four 44
III.16. Bilan thermique 45
III.17. Pertes thermiques 45
III.18. Calcule du rendement du four 46
III.19. Programmation sur MATLAB 51
III.20. Résultats du programme 53
III.21. Résultats du programme saus forme des courbes..... 54
III.21.1.Variation du rendement en fonction de température des fumées..... 54
III.21.2.Variation de la chaleur perdue par fumées en fonction de la température Des fumées..... 55
III.21.3. L'influence de la température de l'air de combustion sur le rendement... 56
III.21.4. L'influence de la chaleur de combustion sur le rendement..... 57
III.21.5. L'influence de la température d'air de combustion sur la chaleur d'air.... 58
III.22. Les paramètres dont dépend le rendement..... 58
III.23. Possibilités et limites à l'amélioration du rendement 59
III.24. Conclusion 60

Chapitre IV : Technologies d'amélioration du rendement du four

IV.1. Introduction 61
IV.2. Discussion des résultats 61
IV.3. Système de préchauffage de l'air 61
IV.4. Le contrôle de la température froide des fumées 63
IV.5. Les types des systèmes de préchauffage de l'air 63
IV.6. Choix de type de préchauffeur de l'air 64
IV.7. Ajustement de l'excès d'air 65
IV.8. Technologies d'améliorations du four 65
IV.9. Réduction des polluants 67
IV.10. Conclusion 67

Conclusion 68

Références bibliographique 69

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma de l'unité U100… 7

Figure I.2 : Service maintenance 14

Figure II.1 : Four à réchauffage indirect 17

Figure II.2 : Four réchauffeur d'air par mélange 17

Figure II.3 : une maquette du four 18

Figure II.4 : bruleur à prémelange 19

Figure II.5 : Four « cabine » à tubes horizontaux 21

Figure II.6 : Four cylindrique vertical 22

Figure II.7 : Four cabine à tubes horizontaux 23

Figure II.8 : Four cabine à bruleurs sur les parois 24

Figure II.9 : Four à chauffage par murs radiants 25

Figure II.10 : Four à double chauffe 26

Figure II.11 : Schéma montrant des exemples d'encrage au casing de béton et brique réfractaire 30

Figure II.12 : Photo de la raffinerie Sidi-Ercine Alger 32

Figure II.13 : Disposition générale du four 33

Figure III.1 : le bilan thermique 45

Figure III.2 : pertes thermiques du four 45

Figure III.3 : Organigramme qui résume le calcul du rendement en fonction de la température d'air de combustion 51

Figure III.4 : Organigramme qui résume le calcul du rendement en fonction de la température des fumées 52

Figure III.5 : La variation du rendement en fonction de la température des fumées 5

Figure III.6 : La variation de la chaleur perdue par fumées en fonction de la température de fumées 5

Figure III.7 : La variation du rendement en fonction de la température d'air de combustion 5

Figure III.8 : la variation du rendement en fonction de la chaleur d'air de combustion 57

Figure III.9 : la variation de la chaleur d'air en fonction de la température d'air 58

Figure IV.1 : Réchauffeur d'air de combustion four cylindrique 6

Figure IV.2 : Installation de préchauffeur d'air 6

Liste des tableaux

Tableau I.1 : les produits finis et leurs destinations.....6

Tableau I.2 : Les mouvements des produits entre la raffinerie, les dépôts et le port 11

Tableau I.3 : Les bacs de stockage de l'eau… 13

Tableau II.1 : les valeurs d'excès d'air les plus couramment admises 26

Tableau II.2 : Dimensions les plus courantes des tubes de four 27

Tableau II.3 : Matières des tubes les plus couramment utilisés et les températures d'emplois 28

Tableau II.4 : Propriétés des fibres céramiques.....31

Tableau III.1 : Les principaux constituants de fumées humides 36

Tableau III.2 : valeurs des pouvoirs comburivores de quelques corps purs 39

Tableau III.3 : la composition chimique du gaz naturel Algérien..... 41

Tableau III.4 : Les quantités de chaleurs entrantes et sortantes..... 50

Tableau III.5 : La variation du rendement en fonction de la température de fumées pour chaque excès d'air..... 53

Tableau III.6 : La variation du rendement en fonction de la température d'air de combustion pour chaque excès d'air..... 53

Tableau III.7 : La variation de la chaleur perdue par fumées en fonction de la température de fumées pour chaque excès d'air 53

Tableau III.8 : La variation de la chaleur d'air de combustion en fonction de la température d'air de combustion..... 54

NOMENCLATURE

A : Surface d'échange (m2)

Cp : Chaleur spécifique (kcal/kg°C)

d : Diamètre (m)

F : Facteur d'échange de rayonnement

h : Coefficient de transfert convectif (W/m2)

H: Enthalpie (kcal/kg)

H : Hauteur (m)

L : Longueur (m)

$\dot{m}$: Débit (kg/h)

P: Pression (bar)

PCI : Pouvoir calorifique inférieure (kcal/kg)

PCS : Pouvoir calorique supérieure (kcal/kg)

q : Flux de chaleur (W/m^2)

Q : Flux de transfert de chaleur par convection (W)

Q : Débit de chaleur (kcal/h)

T : Température (K),(°C)

W : Largeur (m)

Lettres Grecques

σ : Constante de Stefan-Boltzmann

α : Facteur d'efficacité d'absorption ($W/m^2 K^4$)

η : Rendement (%)

Indices

a : air

com : combustion

ent: entrée

f: fumées

fg : fuel gaz

fl : fluide

g : gaz chauds

p: paroi

r : radiation

réf : référence

s : surface

t : nombre de tubes

vap : vapeur

ABSTRACT

The objective of this study is based on improving the furnace (F501) of the Algiers refinery to achieve this goal by first calculating the yield of this furnace using a set of theoretical, thermodynamic and an energy balance to arrive at the general yield formula, the sequence of these theoretical formulas have been translated into an algorithm on a MATLAB language, the start-up of this program has enabled us to obtain results with great precision and in to demonstrate with this software the parameters that influence the yield this method gave us an easy controllability of these parameters and finally we proposed solutions to increase the yield

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو تحسين الفرن(F501) لمصفاة الجزائر لتحقيق هذا الهدف من خلال حساب عائد هذا الفرن أولًا باستخدام مجموعة من التوازن النظري والديناميكا الحرارية والطاقة للوصول إلى صيغة العائد العامة ، تمت ترجمة تسلسل هذه الصيغ النظرية إلى خوارزمية بلغة ا MATLAB ، وقد مكّننا بدء تشغيل هذا البرنامج من الحصول على نتائج بدقة كبيرة وفي اقترحنا إظهار المعلمات التي تؤثر على العائد باستخدام هذه الطريقة مع هذا البرنامج. سهولة التحكم في هذه المعلمات وأخيرً اقترحنا حلولًا لزيادة العائد

Résumé

L’objectif de cette étude est basée a améliorer le four (F501) de la raffinerie d’Alger pour atteindre ce but en a calculer d’abord le rendement de ce four a laide d’un ensembles des formules théorique , thermodynamique et d’un bilan énergétique pour arriver a la formule générale du rendement , l’enchaînement de ces formules théoriques sont étées traduits en algorithme sur un langage MATLAB , la mise en marche de ce programme nous a permis d’obtenir des résultats avec une grande précision et en a démontrer avec ce logicielle les paramètre qui influencent sur le rendement cette méthode nous a donné une contrôlabilité facile de ces paramètres et finalement on a proposé des solutions pour augmenter le rendement

Introduction générale

Le secteur de l'énergie en Algérie occupe une place prédominante dans l'économie de l'Algérie, les hydrocarbures à eux seuls représentent 60% des recettes du budget et 98% des recettes d'exploration.

L'Algérie est en 2015 le 18ème producteur de pétrole, le 10ème producteur de gaz naturel et le 6ème exportateur de gaz naturel au monde.

La production et la consommation d'énergie, y compris dans le secteur de l'électricité, sont tirées des hydrocarbures à plus de 99%. [1]

Les produits pétrochimiques sont employés dans la fabrication de milliers de produits utilisés au quotidien qu'il s'agisse des nombreux objets en plastique, médicament, dispositifs médicaux et produits cosmétiques, ou de pratiquement quel autre produit des meubles aux transports. Les produits pétrochimiques sont dérivés de l'éthane, du propane, du butane et d'autres hydrocarbures liquides extraits du pétrole brut et du gaz naturel. [2]

Le pétrole brut doit être purifié, fractionné et traité (raffiné) pour produire des produits finis qui peuvent être vendus. Ceux-ci comprennent l'essence, le diesel, le mazout et les lubrifiants, le propane et le butane.

Le four joue un rôle important dans la conversion des produits dans les usines pétrolières, pétrochimiques et de carbonisation. Dans de nombreux cas, la panne du four ou de l'un de ses accessoires peut entraîner une immobilisation de l'équipement.

La performance du four dans une installation pétrolière et gazière joue un rôle clé dans les paramètres de sélection de l'équipement.

L'efficacité du four est appelée le rapport de la chaleur utile utilisée à la chaleur totale dégagée lors de la combustion du combustible.

La détermination de l'efficacité du four est particulièrement importante car elle détermine la consommation de combustible. Elle explique à elle seule une grande partie de l'évolution du four, dont la conception a été largement influencée par le prix du combustible.

L'évaluation des performances d'un four nécessite la compréhension et la maîtrise des flux entrants et sortants (matière et chaleur), pour lesquels nous réaliserons des bilans thermiques.

Le but de notre travail est de calculer ,améliorer ,optimiser le rendement du four F501

Après avoir déterminer la formule du rendement, nous allons voir les paramètres dont dépend le rendement.

Pour qu'on puisse calculer le rendement en fonction de ces paramètres, on va faire un programme sous MATLAB, puis on va trasser les courbes de rendement en fonction de ces paramètres afin de voir leur influence sur le rendement

Dans cette etude on va proposé des solutions possibles pour améliorer le rendement du four.
Le plan de travail est scindé en quatre chapitres :

- Dans le chapitre I en vas localiser géométriquement la raffinerie d'Alger et faire une démonstration sur les déférente installation, et leur mode de fonctionnement
- Dans le chapitre II on vise les fours pétrolières, le mode de fonctionnement de chaque type et les principaux critères d'un meilleur choix du four
- En a parlé dans le chapitre III de la combustion et tout ce qui s'y rapporte en suite on est passé au bilan thermique en second lieu on calcule le rendement et on cherche les paramètres qui influence sur la capacitér en utilisent un programme sur MATLAB pour optimiser le four
- L'optimisation à trouver lieu aussi dans le chapitre IV mis à part ce que en abordér dans le chapitre précédant et nous avons discuté les résultats qu'on a trouvé dans le chapitre III et on a donné des solutions pour améliorer le rendement du four

Chapitre I : Présentation de la raffinerie d'Alger

Chapitre I : Présentation de la raffinerie d'Alger

I.1. Introduction :

Le pétrole, ou « l'or noir » en référence à sa couleur et son prix élevé est un mélange complexe d'hydrocarbure de différentes familles (paraffinées, naphténiques, aromatiques) associé à des composés oxygénés, azotés et sulfurés ainsi qu'à des traces particulières (métaux, sels…..). Son exploitation est l'un des piliers de l'économie contemporaine. En effet, il est devenu à partir de la fin des années 50 la première source d'énergie dans le monde. Il est exploité pour obtenir un nombre de produits utilisés quotidiennement en cosmétiques, huiles essentielles, savons, peintures, etc. Mais il est surtout utilisé comme carburant pour les voitures, les avions, bateaux et autres moyens de transport.

Le raffinage du pétrole est un procédé industriel qui permet de transformer le pétrole brut en différents produits finis tels que l'essence, le fioul lourd ou le naphta. Mélange hétérogène d'hydrocarbures divers (molécules composées d'atomes de carbone et d'hydrogène).le pétrole brut est inutilisable en l'état (il existe plusieurs types de pétrole brut qui se distinguent entre autres par leur viscosité et leur teneur en soufre). Ses composants doivent être sépares afin d'obtenir les produits finaux exploitables directement.

Le raffinage ne se limite plus aujourd'hui à la séparation des différents hydrocarbures. Des procèdes chimiques complexes sont également mis en œuvre afin d'optimiser les produits finaux. Les différentes coupes pétrolières peuvent ainsi subir des transformations, des améliorations et des mélanges pour obtenir des produits commercialisables et répondre notamment aux nouvelles normes environnementales.

La raffinerie se traduit par le nombre d'unités de fabrication. Ces unîtes utilisent des procèdes physiques ou chimiques que l'on peut classer en trois catégories à savoir : la séparation, la conversion, l'épuration.

Mais l'objectif d'un raffineur est avant tout de répondre à la demande en produit pétroliers. Aujourd'hui, le développement du transport routier et aérien s'est accéléré, et la demande en produits légers est montée en flèche. Parallèlement, on brule beaucoup moins de produits lourds pour produire de l'électricité ou pour se chauffer. La demande mondiale est environ de 40% pour les produits légers (carburants), 40% pour les produits moyens (fioul, gazole) et 20 % pour les produits lourds. Le seul pétrole correspondant à peu près à ces proportions est le brut léger du Sahara Algérien. Mais la plupart des bruts extraits dans le monde contiennent plus de produits lourds.[3]

I.2. Présentation de la raffinerie :

SONATRACH est la compagnie Algérienne de recherche, d'exploitation, de transformation et de commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivés. C'est la première entreprise du continent Africain. Elle est classée 12ème parmi les compagnies pétrolières mondiales, 2ème exportateur de GPL et 3ème exportateur de gaz naturel. Ses missions à propos du service technique consistent en :

- ✓ Le raffinage des hydrocarbures et diries de toutes les opérations qui y sont liées.
- ✓ Le développement de toutes activités conjointes en Algérie et hors Algérie.
- ✓ Le respect des spécifications et de la quantité des produits raffinés.
- ✓ Toutes opérations industrielles, commerciales, financières et immobilières.

I.3. Situation géographique de la raffinerie :

La raffinerie d'Alger se situe à 5 Km au sud d'EL Harrach et à 20 Km à l'Est d'Alger, occupant une superficie de 182 hectares. Cet emplacement a été choisi après une étude du sol et la découverte d'une nappe d'eau nécessaire pour l'alimentation des systèmes de refroidissement [3].

I.4. Historique de la raffinerie :

La Raffinerie d'Alger fut créé en décembre 1959 suite à la découverte du pétrole au sud algérien en septembre 1959, le chantier fut ouvert en janvier 1960, le démarrage de la raffinerie n'a eu lieu que le 19 janvier 1964 par un groupe de compagnies étrangères. Le coût de construction est estimé à 210 millions dinars dont 170 millions par les installations et 40 millions de frais établis et autres. Avant 1971, l'alimentation de la raffinerie était par tankers du pétrole de Bejaia au port pétrolier d'Alger, en suite par pipe de 26 pouces, jusqu'au parc de stockage. Un piquage a eu lieu à Beni Mansour à partir de pipe reliant Hassi-Messaoud - Bejaia, un oléoduc de 18 pouces d'une longueur de 131 Km jusqu' à la raffinerie avec un débit de 500 m^3/h, ce pipe qui a été refait en 20 pouces avec un débit atteignant jusqu'à 800 m^3/h. En ce qui concerne le choix de la région algéroise, elle se présente comme un pôle futur de développement industriel. En plus, elle a l'avantage d'être le plus grand centre de consommation avec une part de 40% à 50% de la demande intérieur. Il apparait clairement que la production à partir de la raffinerie d'Alger sera moins coûteuse que celle venant des autres raffineries. La Raffinerie, sur le plan quantitatif, veut continuer à assurer la couverture des besoins en produits de première nécessité comme l'essence, gasoil, GPL,…etc., ainsi que les produits qui servent de base pour l'industrie pétrochimique. Sur le plan qualitatif, un programme est mis en place, qui consiste en la suppression du plomb des essences avec une réduction actuelle de 0.4 g/l depuis le premier janvier 1999, jusqu'à 0.15 g/l à partir du premier janvier 2002 et la suppression totale du plomb prochainement. [3],[4]

I.5. Capacité de production :

Le but primordial de la raffinerie est de continuer à assurer la couverture des besoins enproduits de première nécessité, ainsi que les divers produits pour l'industrie pétrolière.

La raffinerie a une gamme variée de produits qui répondent aux normes nationales et internationales qui sont :

- Butane et propane commerciaux ;
- Naphta (30% essence SR+70% solvant total) ;
- Essences normale et super ;
- Jet (Kérosène) ;
- Gas-oil ;
- Fuel lourd.

La capacité de production de la raffinerie d'Alger est de 2 700 000 tonnes/an.

I.6. Description des principales installations :

La Raffinerie d'Alger est composée de plusieurs installations qui sont :

- Unité de distillation atmosphérique de 2 700 000 tonnes/an.
- Une unité de reforming catalytique de 2 500 m^3/j dont le rôle est de transformer une coupe pétrolière à bas indice d'octane (mélange de solvant léger et de solvant lourd) provenant de l'unité de distillation en un reformat à haut indice d'octane qui est la base principale pour la fabrication des carburants automobiles (essence normale et essence super).
- Unité Gas-plant pour la séparation et traitement des GPL.
- Un parc de stockage pour le pétrole brut et pour les produits finis et semi-finis.
- Une unité de pomperie pour les expéditions de produits par pipes aux dépôts El- Harrach, Caroubier, du Port pétrolier, de l'Aéroport d'Alger au dépôt Chiffa (Blida).
- Unité de mélange (Ethylation) pour la fabrication des essences (Normal et Super).
- D'un port pétrolier équipé de trois postes de chargement et déchargement ainsi qu'une station de déballastage et d'écrémage d'hydrocarbures.
- D'un laboratoire de contrôle de la qualité des produits.
- Une centrale thermoélectrique constituée d'un groupe turboalternateur qui développe 6MW d'énergie électrique, la centrale a pour but d'assurer les besoins énergétiques de la raffinerie (vapeur, eau, électricité, air).
- Deux chaudières à vapeur de 47 tonnes/h chacune.
- Deux stations de traitement des eaux.
- commandement d'intervention en 24/24h.
- Plusieurs ateliers de maintenance et de magasins
- D'une rampe de chargement GPL alimentant les régions du centre du pays

La raffinerie d'Alger c'est là qu'on transforme le pétrole brut en gaz, essences, et autres carburants à l'aide de trois unités principales U100, 200 et 30

I.6.1. Unité de topping U100 : Unité de distillation atmosphérique :

A partir des bacs de stockage A301, A302, A303 le pétrole brut de Hassi- Messaoud ou le mélange de brut Hassi-Messaoud avec des proportions variables n'excédant pas 28%en poids de condensât Hassi-R'Mel, est pompé à une température de 27°c au moyen des pompes verticales P101A, P101B, P101C.

Cette unité a pour but de fractionner le brut en produits finis : Kérosène ; gas-oil moteur; fuel et GPL (Butane et Propane) qui seront directement stockés avant d'être commercialisés, ainsi qu'en produits intermédiaires : solvants léger et lourds quiserviront de charge pour l'unité de reforming catalytique. Sa capacité de traitement est de 2 700 000 tonnes/an.

A partir des bacs de stockage A301, A302, A303 le pétrole brut de Hassi- Messaoud ou le mélange de brut Hassi-Messaoud avec des proportions variables n'excédant pas 28% en poids de condensât Hassi-R'Mel, est pompé à une température de 27°c au moyen des pompes verticales P101A, P101B, P101C.

Cette unité a pour but de fractionner le brut en produits finis : Kérosène ; gas-oil moteur ; fuel et GPL (Butane et Propane) qui seront directement stockés avant d'être commercialisés, ainsi qu'en produits intermédiaires : solvants léger et lourds qui serviront de charge pour l'unité de reforming catalytique. Sa capacité de traitement est de 2 700 000 tonnes/an.

L'unité de distillation atmosphérique comprend :

- Un train de préchauffe.
- Un ballon de flash D102.
- Un four F501.
- Un ballon fuel-gaz D107 pour alimenter le four F501.
- Une colonne de distillation atmosphérique C101.
- Une Tour de débutanisation C104.
- Une Tour de redistillation C105. [3], [4]

Produits	Destinations
GPL	**Charge pour l'unité Gaz-plant**
Essence SR	**Base pour les essences** **Base pour les naphtas export**
Solvant léger (97- 108°C)	**Utilisé comme charge du reforming enmélange avec le solvant lourd** **Base pour naphta export**
Solvant lourd (168-178°C)	**Utilise comme charge de l'unité du reforming en mélange avec le solvant léger. Base pour naphta export**
Kérosène (228-238°C)	**Jet –A1 pour aviation**
Gas-oil Léger (278-289°C)	**Carburant diesel**
Distillat (330-340°C)	**Utilisé comme combustible pour chaudière et en mélange avec du résidu pour la fabrication du fuel-oil BTS**

Tableau I.1 : Produits finis et leurs destinations.

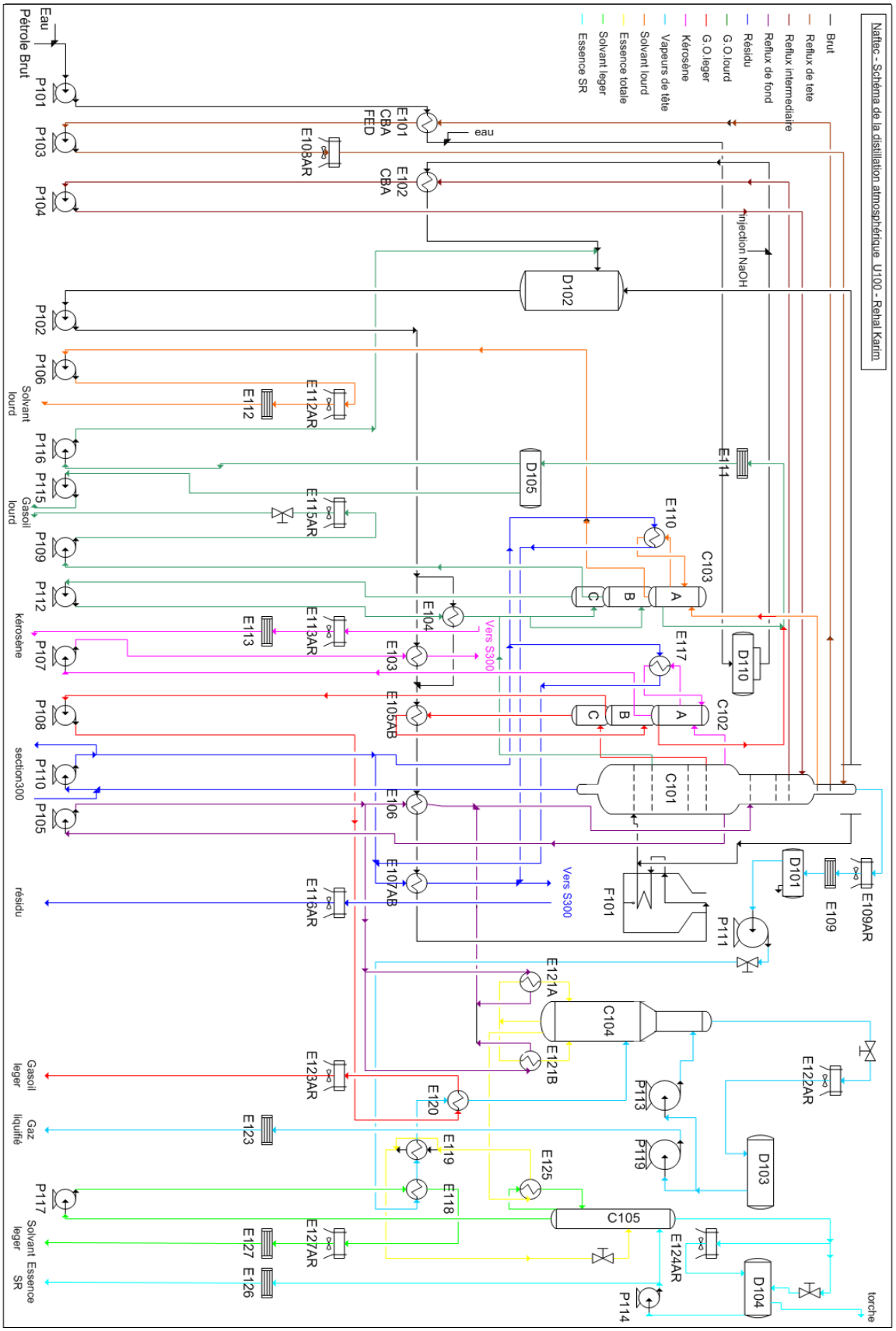


Figure I.1 : Schéma de l'unité U100

I.6.2. Unité 200 : Unité de plateforming (reforming catalytique)

La charge (solvant) venant soit de l'unité 100 (distillation atmosphérique) soit des bacs A102, A103, A104 est reprise par la pompe P204 A ou B.

Cette unité a pour objectif d'augmenter l'indice d'octane du mélange solvant léger- solvant lourd par les - destiné à la fabrication des essences. Sa capacité de traitement est de 2500m^3/j.

L'unité de reforming catalytique comprend :

- Un train de préchauffe
- Un réacteur de garde (R201) utilisant un catalyseur pour retenir les poisons contenus dans la charge.
- Une section catalytique avec deux fours (F202 et F203 avec petite et grande cellule), trois réacteurs (R202, R203, R204) et un ballon séparateur d'hydrogène D203.
- Un ballon fuel-gaz D214 pour alimenter les fours F202, F203, F204.
- Un turbocompresseur (K201).
- Une section de stabilisation avec une colonne (C202) et un four F204 : pour chauffer le fond de la colonne afin de séparer les GPL du plat- format et l'envoyer vers l'unité de gaz-plant.

I.6.3. Unité 300 : Unité gaz plant (traitement de séparation)

Cette unité permet la séparation et le traitement des gaz venant des deux unités précédentes, pour produire le propane et le butane commerciaux liquéfiés.

Elle a été dimensionnée pour traiter le produit liquide venant des accumulateurs de tête des débutaniseurs de l'unité de distillation et de l'unité de reforming afin d'obtenir du propane et du butane commerciaux. Ces derniers vont traverser des systèmes de purification contenant des tamis moléculaires afin de les débarrasser de toute trace d'humidité et de produits sulfurés.

L'unité 300 comprend :

- ✓ Un ballon tampon D301.
- ✓ Un déthaniseur C301.
- ✓ Un ballon séparateur D302.
- ✓ Un dépropaniseur C302.
- ✓ Un ballon séparateur D303.
- ✓ Traitement butane et propane par des tamis moléculaires (C303A et D305 pourC3, C303B et D307 pour le C4).

I.6.4. Salle de contrôle

Le nombre important d'appareils de mesure équipant une unité de raffinage a conduit à la nécessité de contrôler dans une salle de contrôle toutes les informations nécessaires à la marche de l'unité (températures, pression, débit, niveau, contrôle des vannes …)

I.6.5. Parc de stockage

a. Stockage de pétrole brut :

Le pétrole brut est stocké dans trois réservoirs à toits flottants de 35.000 m^3 chacun(A301, A302, A303).
Ces réservoirs sont munis des accessoires suivants :

- Porte de visite boulonnée.
- Mise à la terre de la cuve et du toit.
- Purge d'eau.
- Purge de toit.
- Indicateur de niveau avec lecture au sommet du bac et transmission à la sallede contrôle.
- Indicateur de température avec lecture au micro-ordinateur de la salle decontrôle.
- Hélico-agitateurs (deux par bac, situés de part et d'autre de la tuyauteried'arrivée du pétrole brut).

b. Stockage des produits finis et intermédiaires :

Le nombre et la capacité des réservoirs ont été déterminés en fonction de la production et des enlèvements.

Les réservoirs pour produits légers (sauf les bacs de solvants) sont des réservoirs à toitflottant.

Les réservoirs pour produits lourds (faible volatilité) ont un toit fixe et certains équipés d'un réchauffeur alimenté en vapeur BP.

Les bacs à toit fixe disposent de soupape de respiration ou évents.

Tous les réservoirs, bien entendu, sont équipés d'une mise à la terre, de trous d'homme,de purge d'eau, (de purge de toit pour réservoirs à toits flottants), d'indicateurs et de transmetteurs de niveau et de températures.

Les 33 réservoirs, (brut 03, produits intermédiaires et finis 30) représentent une capacitéglobale de 322.100 m^3

c. Stockage des gaz liquéfiés

Les gaz liquéfiés sont stockés dans des sphères représentant une capacité de 5500 m^3 pour le butane et 2000 m^3 pour le propane.

Les gaz liquéfiés sont dotés de deux réservoirs cylindriques utilisés pour le stockage (coulage) du butane et propane pendant le démarrage de l'unité gaz plant, représentantune capacité de 200 m^3 pour le butane et 150 m^3 pour le propane. [7]

Ces réservoirs sont équipés de :

- Soupapes de sûreté.
- Jauges à tirette.
- Indicateur de niveau.
- Manomètre.
- Prise d'échantillon.
- L'imitateur de débit.
- Dispositif d'arrosage.

I.6.6 La pomperie

La pomperie comprend une aire maçonnée recevant les pompes et les distributeurs (pipes).

Elle est dotée de plusieurs pompes telles que :

- ✓ **G117 (AB) :** suppresseur sert à augmenter la pression à l'entrée de la pompeG118.
- ✓ **G118 (AB) :** expédition de trois produits vers CHIFFA (Gas-oil, super 96,CA89).
- ✓ **G112 (AB) :** expédition jet A1 vers AVM.
- ✓ **G106 (AB) :** expédition de naphta, gas-oil, kérosène, carburants vers El Harrach,Caroubier, Port.
- ✓ **G111 (AB) :** expédition de fuel-oil vers le port.
- ✓ **G114 (AB) :** expédition de super 96, CA89 vers dépôt (El Harrach, Caroubier,Port) et l'éthylation.
- ✓ **G115 (AB) :** aspiration de l'essence SR et de solvant total vers la tabled'éthylation. (C'est une pompe vertical qui est conçue pour les légers).

Cette unité a deux rôles :

a. L'expédition des produits:

- ✓ Port pétrolier d'Alger
- ✓ L'aéroport Houari Boumediene
- ✓ Les dépôts de carburant : Caroubier, El Harrach et la Chiffa
- ✓ Les expéditions des produits finis à partir de la raffinerie se font exclusivement par un réseau d'oléoducs, chaque oléoduc est muni d'uncompteur, ces indications sont retransmises à la salle de contrôle

Produits	Ø oléoduc	Dépôts	Destination
Jet A1	10"	AVM	**Dar El Beida**
//	16"	AC4	**El Harrach**
Gas-oil	16"	16A	**El Harrach**
//			
	16"	168A, 168B, 169	**Caroubier**
CA/SP	16"	16A	**El Harrach**
CA/SP	16"	168A, 168B, 169	**Caroubier**
Fuel	10"	A82	**Port d'Alger**
Naphta	16"	Port	**Port (navire)**
	10"		
CA/SP		Chiffa	**Chiffa**
Gasoil	**10"**	**Chiffa**	**Chiffa**

Tableau I.2 : Mouvements des produits entre la raffinerie, les dépôts et le port

Les communications entre la raffinerie et les divers dépôts se font actuellement partéléphone et talkie walkies.

b. L'éthylation :

La fabrication de l'essence normale (CA89) et (SP96) à partir d'un mélange composéde :

- Plat format.
- Solvant total.
- Essence SR.
- PTE (plomb tétraéthyle).
- Butane

L'addition du plomb tétraéthyle (ou tétraméthyle) se fait en cours de mélange. Le (PTE) est aspiré à partir d'un ballon de stockage au moyen d'un éjecteur dans lequelcircule l'essence.

I.6.7. Les mélanges :

La raffinerie est équipée pour produire, stocker et expédier deux qualités d'essences finies (normal et super), jet A1, gas-oil moteur, fuel BTS et naphta.

- Essences : Ces deux essences sont fabriquées par mélange en ligne de trois constituants produits par l'unité combinée et stockés dans les réservoirs.
- Jet A1 : Le kérosène sortant de la colonne de distillation atmosphérique subie untraitement au niveau de précipitateur électrostatique pour lui enlever les impuretés indésirable tels que les acides naphténiques et l'eau, après ce traitement il est envoyé aux bacs de stockages.
- Gas-oil moteur : Il est obtenu par mélange en ligne des deux produits (kérosène,gas-oil léger), avec des proportions bien définies pour respecter les spécificationsrequises.
- Fuel BTS : Il est obtenu par mélange en ligne des produits (résidu, gas-oil lourd).
- Naphta : Il est obtenu par mélange en ligne des trois produits (solvant lourd, solvant léger, essence SR), avec des proportions bien définie pour respecter les spécifications requise. [7]

I.6.8. Laboratoire

La raffinerie d'Alger dispose d'un laboratoire qui a pour but d'analyser les différents produits provenant du processus de raffinage. Pour un bon produit il doit correspondre aux critères (les normes des clients). Le service laboratoire dépend du département technique, le laboratoire de la raffinerie est un laboratoire de contrôle des unités et d'analyse des produits finis commercialisés soit sur le marché intérieur ou extérieur. [3]

I.6.9. Les utilités :

La raffinerie d'Alger possède une centrale thermoélectrique, son but est la production de la vapeur et de l'électricité à partir du fuel ou du gaz, de l'air instrument et de l'air de service.

a.Centrale thermoélectrique :

Le principal rôle de la centrale thermoélectrique comme son nom l'indique est la production de l'énergie électrique à partir de la vapeur d'eau envoyée par deux chaudières de 47 tonnes/h à une pression de 35 bars et 410 °C,

Et ça grâce à un dispositif appelé turbo alternateur, qui est un générateur d'électricité, constitué d'une turbine à vapeur et d'un alternateur d'une puissance de 6 MW permettant à la centrale et à l'ensemble de la raffinerie uneautonomie totale pour les besoins énergétiques suivants :

- Production de l'électricité à différant tension, moyenne tension (MT), basse tension (BT) et très basse tension (TBT) tout ça à l'aide d'un groupe turboalternateur " turbine turboalternateur
- La production de l'air service (9 bars) et air instrument par détente (4.5 bars).
- La production de la vapeur d'eau.

b. L'eau dans la raffinerie d'Alger :

L'alimentation en eau de la raffinerie est assurée à l'aide des trois foragessuivants :

- Forage n°4 profondeur 150 m, profondeur pompe 84 m.
- Forage n°7 profondeur 200 m. profondeur pompe 100 m.
- Forage n°8 profondeur 230 m, profondeur pompe 100 m.
- Forage n°9 profondeur 200 m, profondeur pompe 100 m.

Dans cette section on trouve trois bacs de stockage d'eau pour diversesutilisations représentés dans le tableau suivant :

Bac	Produit	Capacité(m*3)	Hauteur (m)
T1	Eau Anti-incendie	5000	**16.20**
T2	Eau d'exploitant	5000	**16.20**
T3	Eau potable	**310**	**10.80**

Tableau I.3 : Bacs de stockage de l'eau.

Le bac T2 constitue la réserve d'eau pour le traitement des eaux des chaudières et le conditionnement d'eau de refroidissement. Il peut éventuellement alimente le bac T3.

Le réseau d'eau potable alimenter par le réseau SEAAL alimente :

- L'ensemble des vestiaires, bureaux, ateliers de la raffinerie ainsi que le restaurant.
- La raffinerie consomme jusqu'à 25 m^3 d'eau pour 1 m^3 de brut traité, d'où la nécessité de l'eau dans les installations pétrolières : Production de la vapeur, refroidissement des machines et des produits, lutte contre l'incendie, eau potable.

c. Utilisations :

L'eau est utilisée à la raffinerie principalement pour les usages suivants :

- Production de la vapeur
- Refroidissement des condenseurs
- Réfrigération des produits pétroliers
- Lutte contre l'incendie.

I.6.10. Atelier de maintenance :

Dans cet atelier, l'équipe de maintenance est chargé pour réparer les équipements dedifférents unités tel que : pompes, échangeurs, vannes, moteurs,… etc.

Maintenance (G) : planning et méthode : c'est la plaque tournante de la maintenanceà travers le programme journalier de travail.

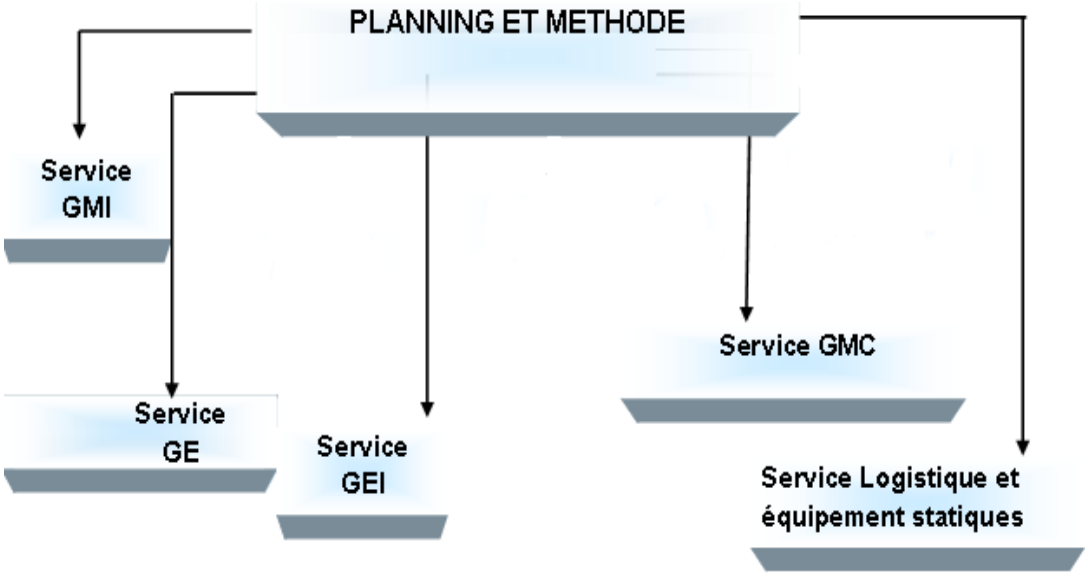


Figure I.2 : Service maintenance

Où :
GMI : service maintenance mécanique industrielle.
GE : service maintenance électrique
GEI : service maintenance électronique instrumentation.
GMC : service maintenance chaudronnerie.

Les différentes zones sont :
- Zone 01 : Les unités 100,200 ,300.
- Zone 02 : La pomperie, expédition, gaz liquéfié.
- Zone 03 : Utilités, sécurité.
- Zone 04 : Le port pétrolier.
- Zone 05 : Divers.
- Magasins généraux pour stockage de matériels et outillage. [3]

I.7. Nouvelles installations et réhabilitations de la raffinerie d'Alger :

Le groupe Sonatrach conscient des défis majeurs auxquels il doit faire face à l'avenir,du fait de la demande croissante du marché en produits raffinés, de la sévérisation progressive des spécifications des carburants (essences et diesel) ainsi que des exigences en termes de santé, de sécurité et de protection de l'environnement, un programme de réhabilitation, de remise à niveau et de modernisation de l'instrumentation des raffineries a été envisagé. Ce programme de réhabilitation et adaptation des installations de production permettra à terme
- D'assurer la continuité du niveau de production actuel sur les moyens et long terme, par un renouvellement et une mise à niveau des équipements,
- D'apporter sur les installations, les améliorations pour l'optimisation du fonctionnement des installations,
- De produire pour le marché national et l'exportation des carburants aux spécifications européennes, pour la préservation de l'environnement.

I.8. Objectifs du programme de réhabilitation et d'adaptation :

- La capacité de traitement actuelle est insuffisante pour la satisfaction de la demande de la région centre en produits raffinés, cette capacité de traitement sera augmentée de 35% c'est-à-dire 3.645.000 tonnes/an. (A l'issue de l'opération de réhabilitation). Installation d'une unité d'isomérisation et d'un Reforming à régénération continue CCR pour produire des essences sans plomb à haute indice d'octane.

- Modernisation de l'instrumentation, et notamment le passage de l'instrumentation actuelle (de type pneumatique) à un système de contrôle basé sur le DCS et évolutif vers le contrôle avancé et l'optimisation de la marche des installations.

- Modernisation des équipements électriques de distribution utilisant la technologie numérique à base de microprocesseur et informatisation du système de supervision du réseau électrique pour la simplicité d'exploitation utilisant Suppression de l'utilisation du plomb dans la production des essences et adaptation des installations pour permettre la production des carburants aux normes Européennes 2009.

- Modernisation et la réhabilitation avec extension des facilités de production et de distribution des utilités (vapeur, air service, air instrument, azote, eau de refroidissement, eau de chaudière, gaz naturel, électricité).

- Réaménagement et extension des facilités de réception, de stockage, et de distribution des produits raffinés.

- Réhabilitation et modernisation des unités de traitements des effluents**,** ce programme permettra également pour la raffinerie d'Alger : La valorisation du Fuel-oil pour augmenter la production des carburants par l'installation d'une unité de RFCC.

- Installation d'une nouvelle unité d'isomérisation de naphta léger,

- Installation d'une unité de prétraitement et de fractionnement de naphta commune aux deux unités d'isomérisation et de Reforming. [9]

- Installation d'une nouvelle unité d'adoucissement et de séparation des GPL.

Chapitre II : Généralités sur les fours pétroliers

Chapitre II : Généralités sur les fours pétroliers

II.1 Introduction :

Les fours sont des équipements clés dans les industries du raffinage et de la chimie et de par leur conception doivent répondre à de nombreuses exigences des utilisateurs.

Les fours sont utilisés dans la production de pétrole et de gaz pour une large gamme d'applications (chauffage du gaz et du pétrole, régénération du glycol, rebouilleurs, génération de vapeur, etc.) il sont principalement utilisé pour élever la température d'un produit.

Dans la plupart des raffineries ou installation pétrochimiques, l'énergie thermique nécessaire au procédé est fournie par un four.

Le four joue un rôle important dans la conversion des produits dans les usines pétrolières, pétrochimiques et de carbonisation. La panne d'un four peut avoir des conséquences économiques importantes.

II.2 Fonction d'un four :

Un four est un appareil dans lequel les fumées issues de la combustion d'un combustible liquide ou gazeux chauffent un fluide. Ils sont dits directement chauffés car la chaleur des fumées est transférée directement au fluide froid circulant dans le serpentin tubulaire.

Ces fours diffèrent des fours à chauffage indirect, dans lesquels le fluide à chauffer circule dans un faisceau de tubes plongés dans un fluide chaud, eux-mêmes chauffés directement par les fumées du combustible.

Les fours à chauffage direct doivent également être distingués des fours hybrides, tels que les régénérateurs de catalyseurs, dans lesquels le fluide à chauffer est chauffé par mélange avec les fumées du combustible.

La chaleur transférée au fluide caloporteur peut être utilisée pour :

- **Réchauffage simple :** élévation de la température du fluide traité pour une transformation physique ou chimique ultérieure (surchauffeurs de vapeur, réchauffeurs de gaz pour reformeurs catalytiques, réchauffeurs d'hydrocarbures liquides (craquage catalytique par unité de charge, fluides caloporteurs, etc.)
- **A une Conversion chimique :** Elle peut se faire par pyrolyse (vapocraqueurs pour la production d'éthylène, craqueurs de dichloroéthane, craqueurs d'acide acétique, etc.). Dans d'autres cas, la conversion a lieu en présence d'un catalyseur (production de gaz de synthèse à partir de gaz naturel ou de naphta, craqueurs d'isopropanol, etc.)

- Mais dans le cas le plus courant, plusieurs opérations sont réalisées simultanément ou séquentiellement dans un même four (ex : four viscoréducteur, où la chaleur sensible, la réaction (craquage thermique) et la vaporisation sont assurées.

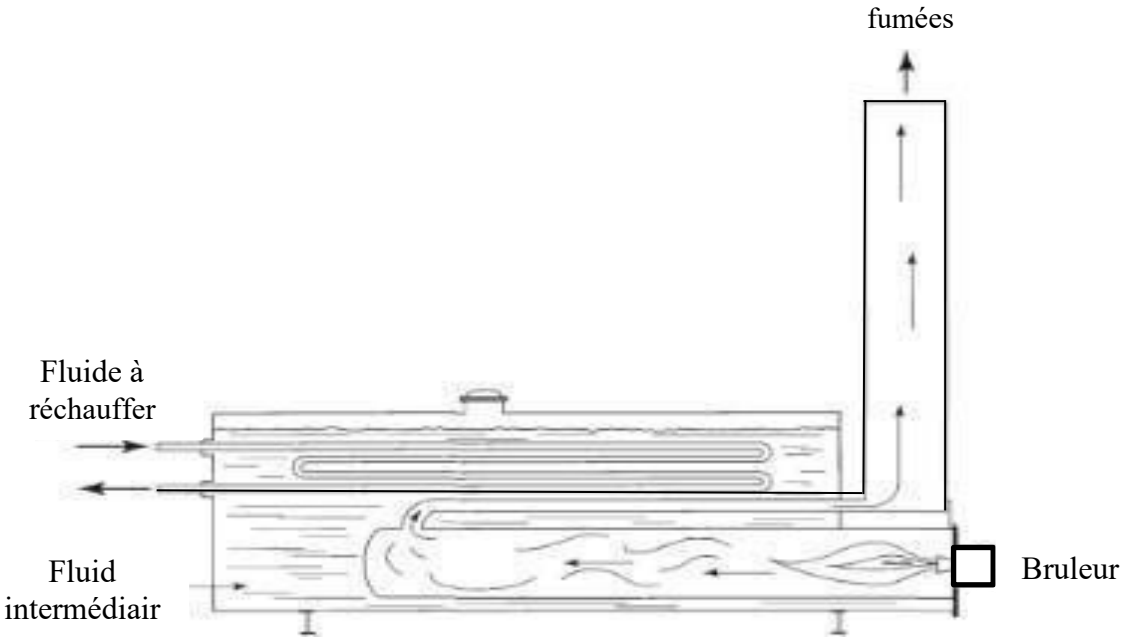


Figure II.1 : Four à réchauffage indirect

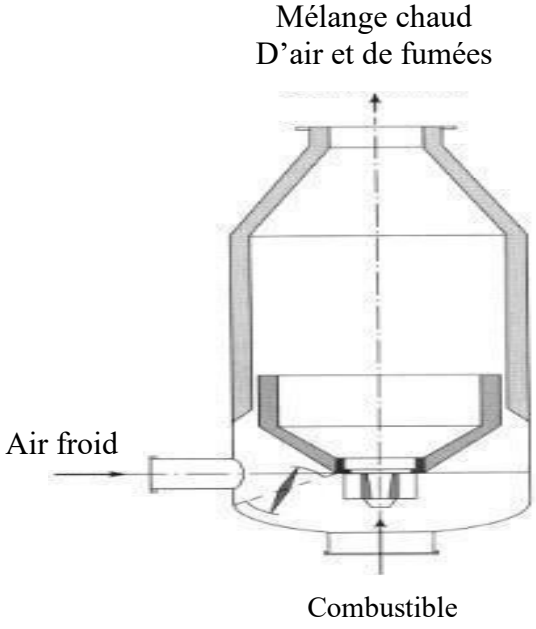


Figure II.2 : Four réchauffeur d'air par mélange

II.3 Description d'un four :

Un four classique comprend

- Un faisceau tubulaire en zone de radiation et en zone de convection.
- Une zone de rayonnement formant la chambre de combustion garnie intérieurementde matériau réfractaire isolant.
- Une zone de convection éventuellement garnie également.
- Un équipement de chauffe comprend des bruleurs situés à la base ou sur les côtés dela chambre de combustion, avec son appareillage.
- Une cheminée ou un carneau pouvant être garnis avec registre
- Les accessoires divers tels que :
- Souffleurs de suie éventuels
- Portes d'accès, portes d'explosion, regards
- Opacimétrie, analyseurs d'oxygène, deprimometre
- Connexions diverses pour la bonne conduite du four.

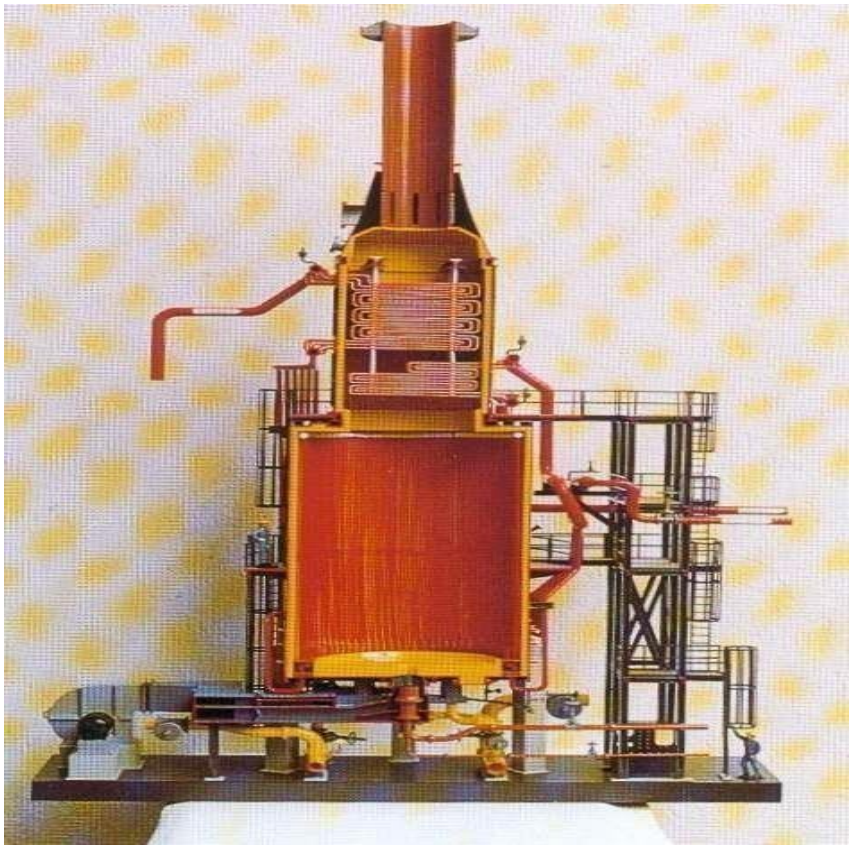


Figure II.3 : Maquette du four

II.4 Brûleurs :

L Un brûleur est un dispositif permettant de réguler la combustion et joue un rôle primordial dans la conception, la construction et le fonctionnement d'un four :

- Il fournit de l'énergie thermique au four et à la charge.
- Il prépare le contact entre le combustible et le comburant.
- Il provoque la circulation des gaz de combustion, ce qui est bénéfique à l'équilibre de la température dans l'enceinte.
- Il crée une liaison entre l'enveloppe du four et la paroi réfractaire qu'il traverse, il s'agit donc d'un point délicat de la construction.

II.5 Types de brûleurs :

Il existe de nombreux types de brûleurs, certains spécifiques à un seul type de four ou à un seul combustible, d'autres destinés à un plus large éventail d'utilisations.

Nous distinguons:

• Brûleurs prémélangés :

Le mélange entre le combustible et le comburant est achevé avant son introduction dans le four.

Ces brûleurs sont uniquement des brûleurs à gaz. 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 en amont du groupe de mélange (retour de flamme).

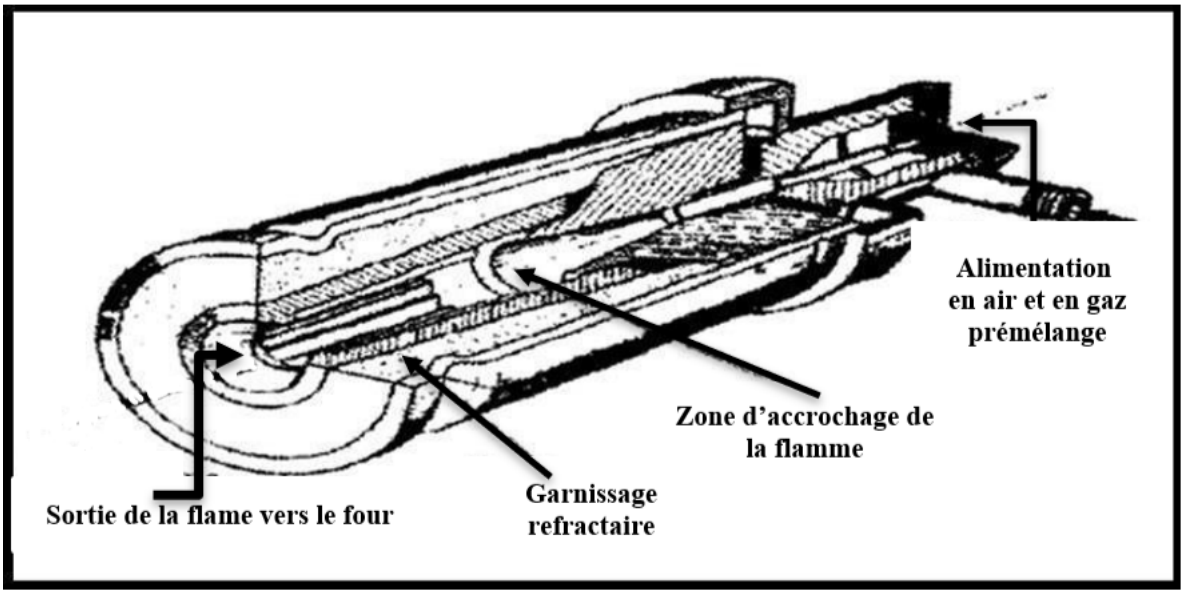


Figure II.4 : Br leur à prémélange

• Brûleurs à flamme à diffusion :

Le mélange entre combustible et comburant s'effectue en sortie des brûleurs ou en tête de ces brûleurs et fait intervenir des combustibles gazeux, liquides et solides sous forme pulvérisée. En agissant sur la vitesse et le débit, ils permettent d'obtenir des formes de flammes très différentes.

II.6 Principaux types de fours

Il existe différents types de fours tubulaires avec des géométries particulièrement différentes :

• Fours cylindriques :
  - Four cylindrique à tubes verticaux
  - Four à deux zones radiantes cylindriques et convection ordinaire
  - Four à poutres spirales
• Four cottage
  - Four tubulaire horizontal
  - Four à caisson
  - Four tubulaire vertical
  - Four tubulaire horizontal
• Four à deux fours
  - Fours à tubes horizontaux ou verticaux
• Four spécial
  - Reformeur catalytique
  - Reformeur de vapeur
  - Four avec brûleur à dôme
  - Brûleur mural

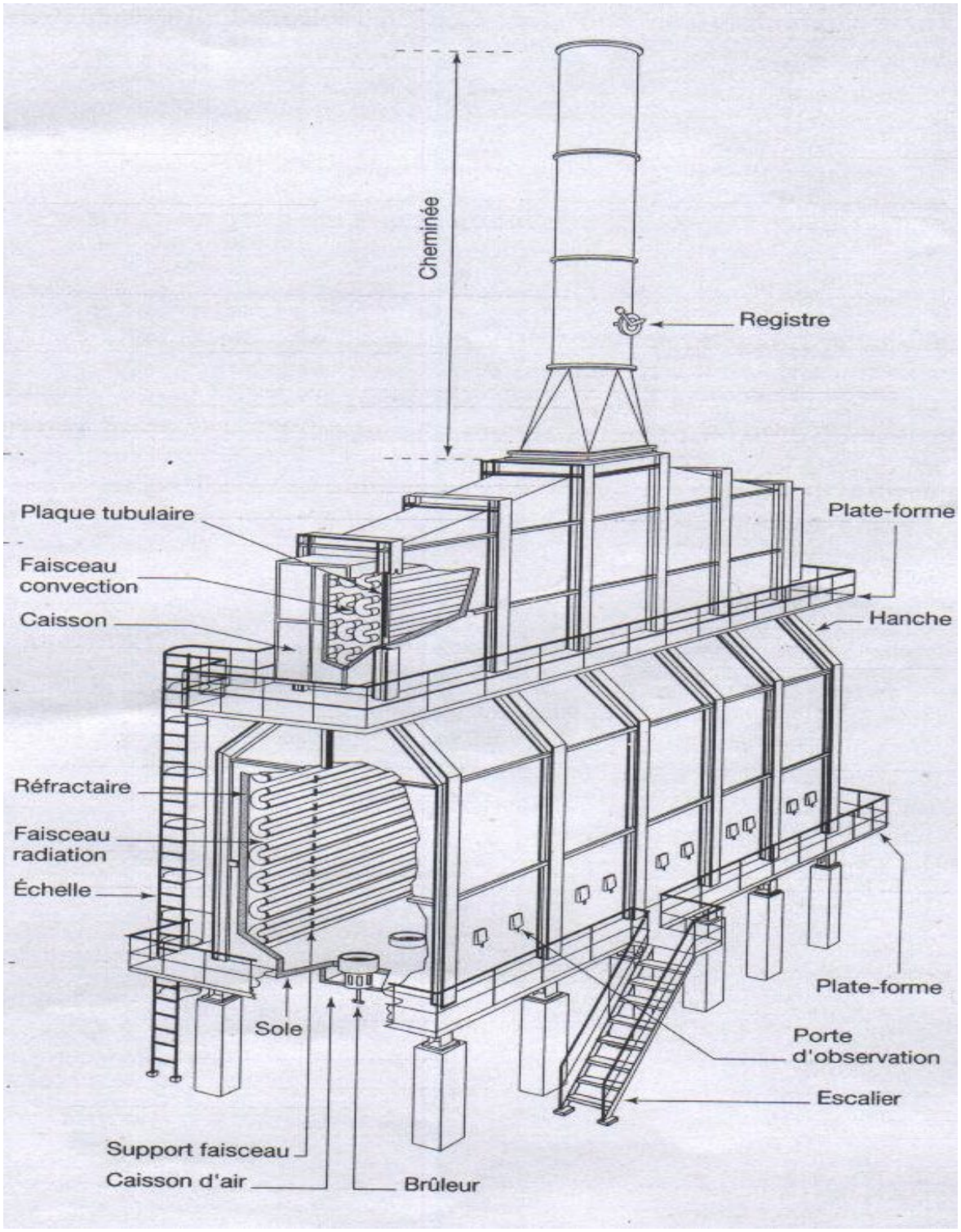


Figure II.5 : Four « cabine » à tubes horizontaux

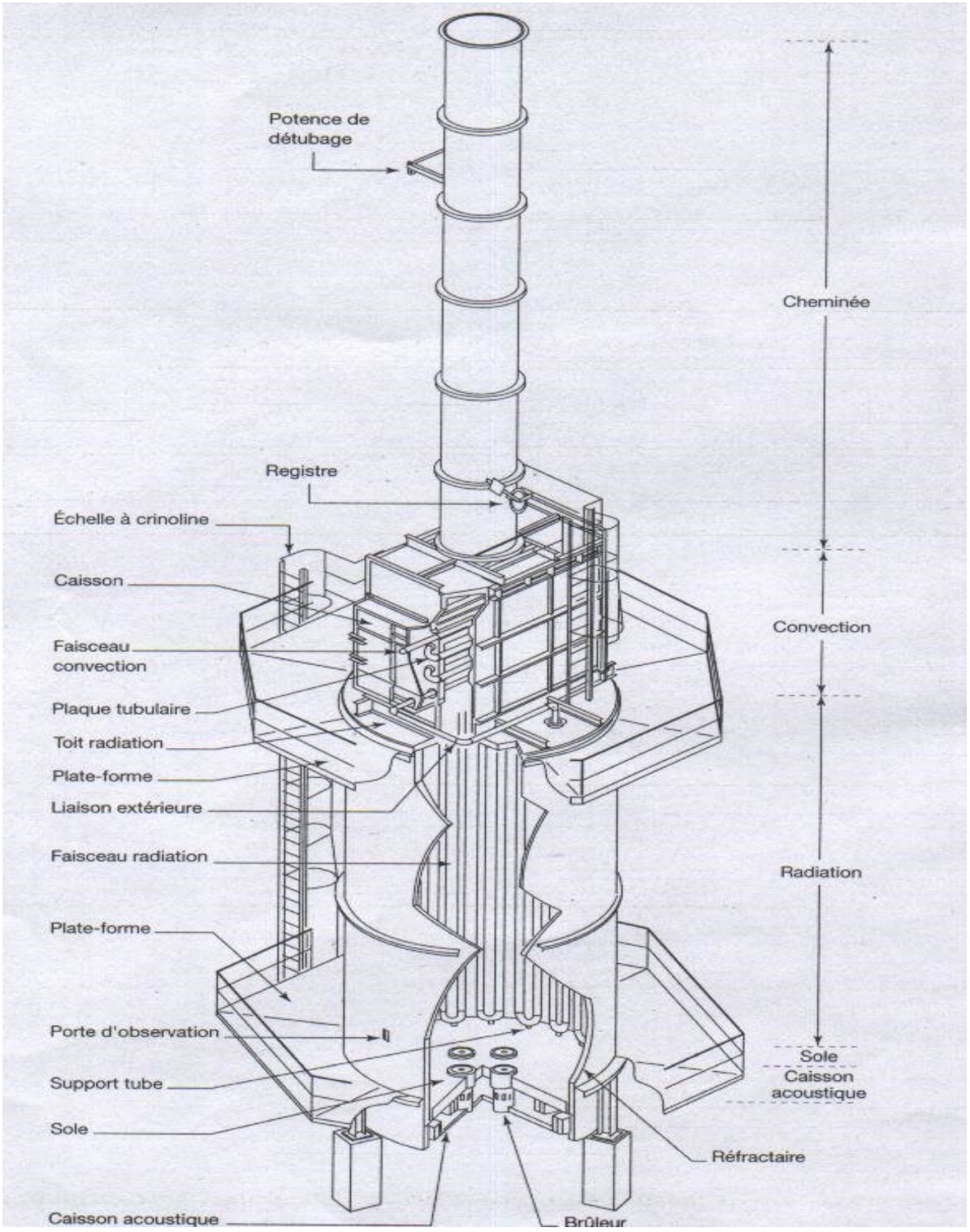


Figure II.6 : Four cylindrique vertical

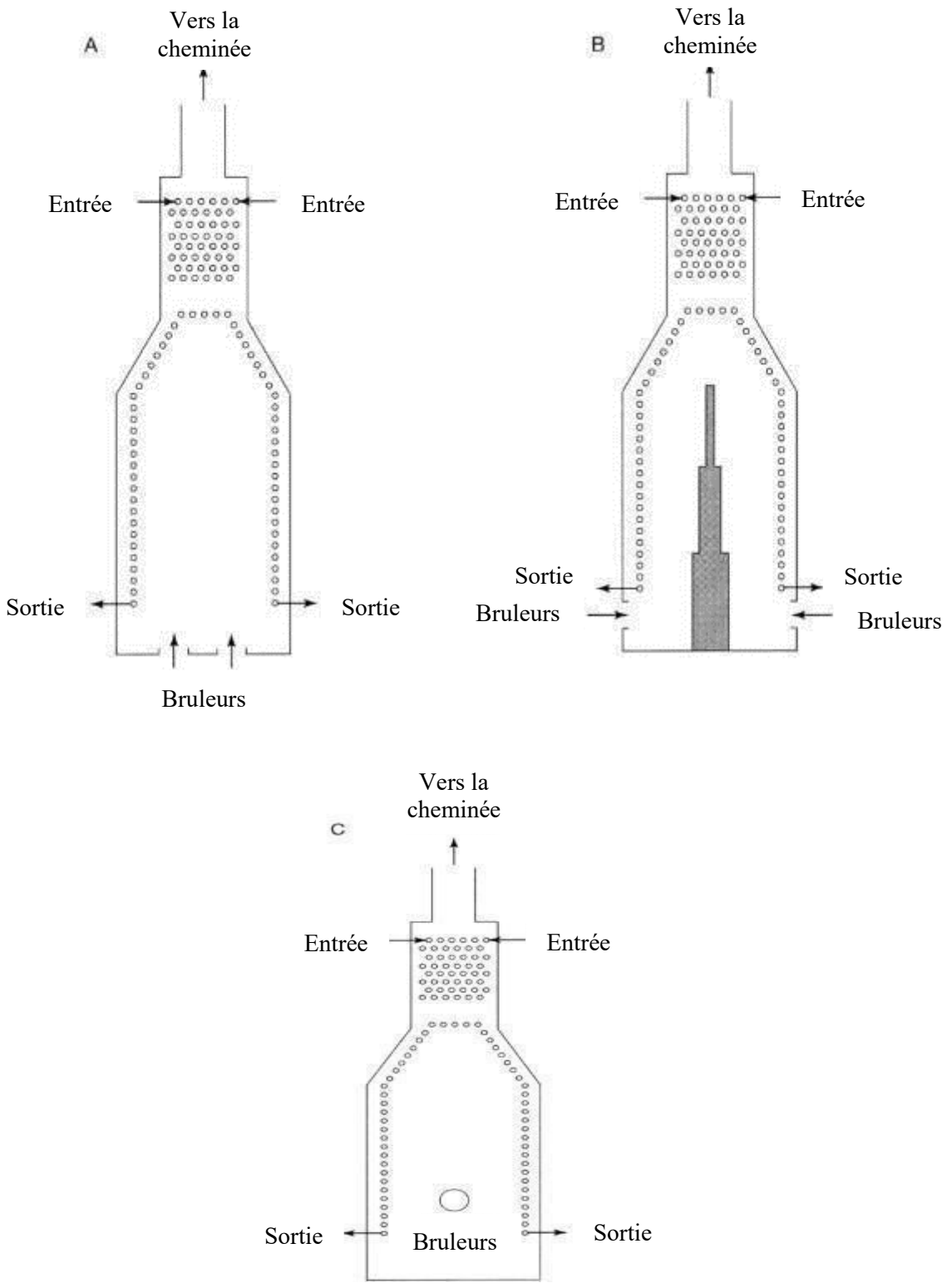


Figure II.7 : Fours « cabines » à tubes horizontaux [11]

A : Monocellulaire, bruleurs sur le sole,

B : Avec murs de séparation latéraux.

C :Monocellulaire, bruleurs sur murs d'extrémité.

- **Four cabine à bruleurs sur la sole :**

- Four cabine à bruleurs sur la sole se distingue essentiellement du four cylindrique par l'existence d'un plan de symétrie ce qui conduit à disposer un grand nombre de bruleurs sur la sole pour réaliser un rideau de flammes dans le plan médian de la zone de radiation.
- On peut installer des tubes horizontaux d'une très grande longueur (jusqu'à 40 m)
- La largeur de la zone de radiation est d'environ 6m et la hauteur de 10 m à 15 m.
- Dans certains cas pour limiter la longueur du four, on découpe la zone de radiation en deux cellules disposées parallèlement et surmontées d'une zone de convection commune.
- Peut attendre des puissances thermiques très élevées dépassant 200 000 th/h

- **Fours cabines à bruleurs sur les parois :**

- Certains procédés comme le vapocraquage exigent un apport de chaleur intense au faisceau tubulaire et un niveau de température élevé.
- Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de repartir l'apport de chaleur sur toute la hauteur du four ce qui conduit à disposer des bruleurs sur toute la surface de la paroi.
- Le faisceau tubulaire est situé dans le plan médian du four.
- La zone de convection est utilisée pour préchauffer la charge et la vapeur de dilution et éventuellement surchauffer la vapeur produitedans les chaudières de trempe.
- Le four cabine occupe une place au sol bien supérieure à celle d'un four cylindrique.

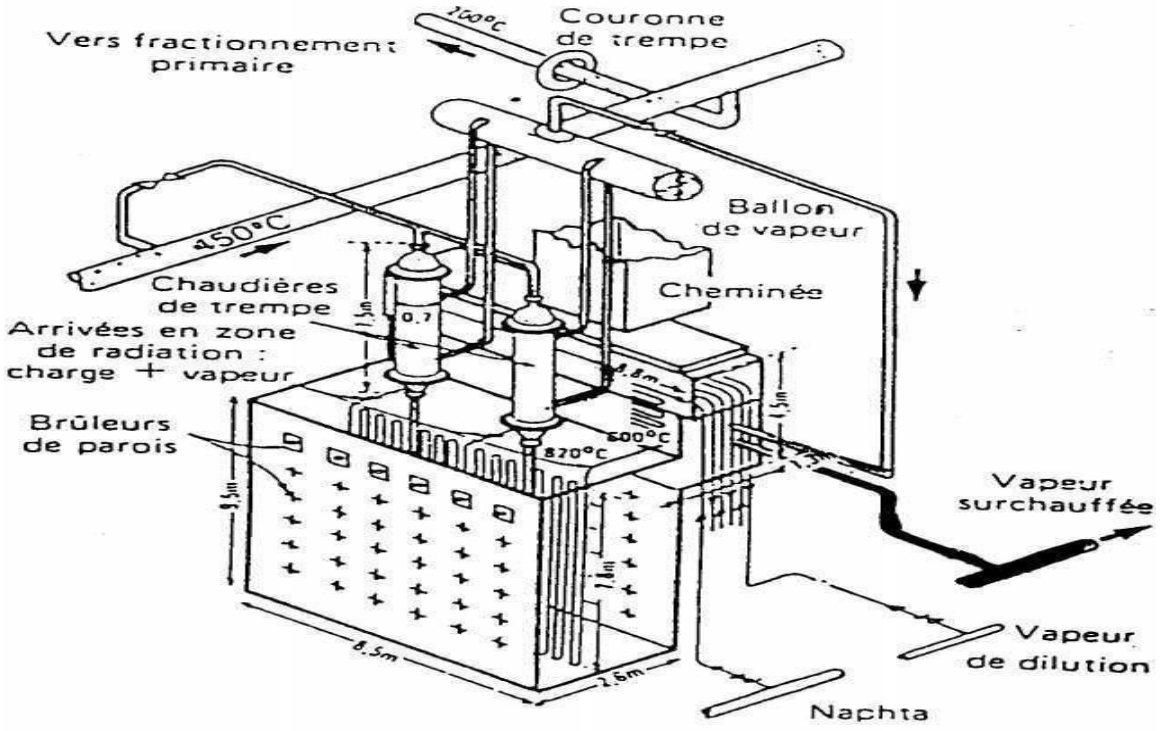


Figure II.8 : Fours cabines à bruleurs sur les parois

- **Four à chauffage 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.

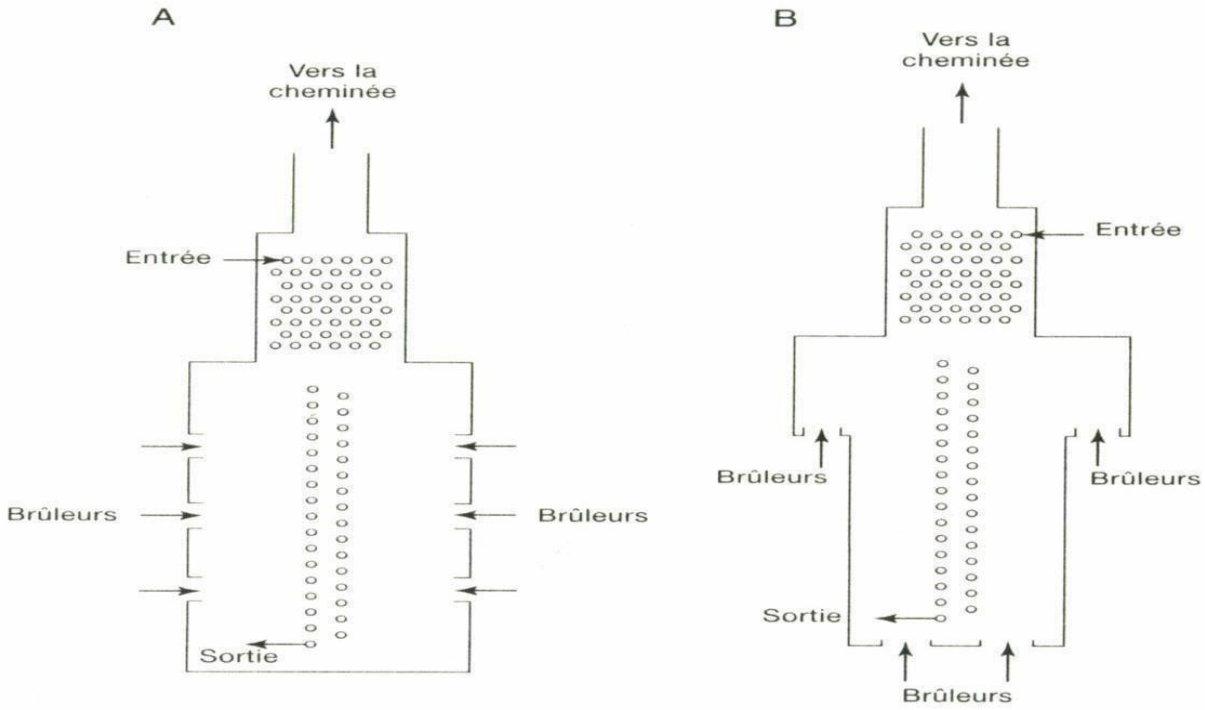


Figure II.9 : Fours à chauffage par murs radiants

- **Les fours dits à double chauffe** :

Dans ces derniers, le plan des tubes constituant la surface d'échange, et dans le plan médian des rangs de brûleurs. Pour tous les types de fours cités ci-dessous, à l'exception des cas ou les brûleurs sont en voûte, la zone de convection peut être située au-dessous de four. La zone de convection peut également être placée sur 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.

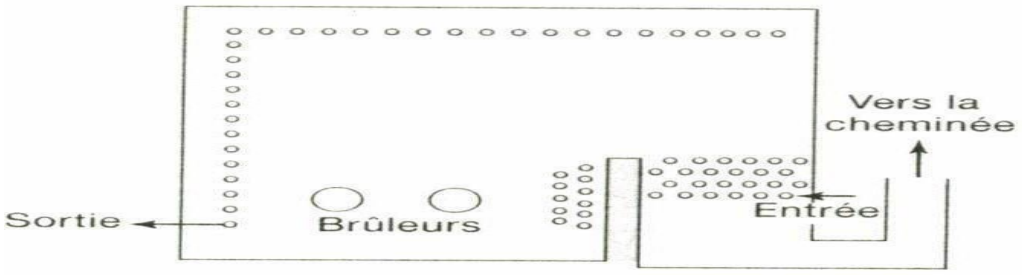


Figure II.10 : Fours à double chauffe

L'enveloppe du four n'est pas parfaitement étanche, notamment suite au vieillissement et aux nombreux passages de tubes. Pour des raisons de sécurité ou pour la 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- dessous de la zone de convection, ou au sol à côté du four. L'air de combustion est introduit dans les brûleurs, soit par la dépression régnant dans chambre de combustion (brûleur à tirage naturel), soit à l'aide d'un ventilateur (brûleurs soufflés). Pour assurer la combustion compète du combustible, un excès d'air, par rapport à la valeur stœchiométrique, doit être ajouté. Cet excès d'air dépend, de la température de l'air de combustion et principalement du combustible. Les valeurs d'excès d'air lesplus couramment admises sont, en pour-cent de l'air stœchiométrique [13] :

Combustible	Air froid (20°C)	Air chaud (300°C)
Fuel oïl Gaz	**20-25** **10-15**	**5-15** **5-10**

Tableau II.1 : Les valeurs d'excès d'air les plus couramment admises [14]

La régulation de la proportionnalité carburant –combustible peut être assurée en fonction de l'indication donnée par :

- un analyseur d'O2
- un analyseur de CO2
- un instrument mesurant le débit ou la pression de combustible
- un instrument mesurant le débit ou la pression de comburant

Le choix des indicateurs à exploiter est conditionné par le type de brûleurs considéré. Précisons qu'avec un équipement de chauffe à air soufflé toutes les possibilités sont permises alors qu'avec des brûleurs à air induit l'information ne peut être donnée essentiellement que par des analyseurs de CO2, et O2. L'utilisation de cette fonction de régulation n'est pas encore très répandue dans les fours. Les impératifs sur la pollution et la recherche sur l'amélioration du rendement de la combustion en favorisant l'emploi.

II.6 Principaux critères de choix d'un four :

- Caractéristiques du fluide
- Condition de service (Température, Pression, Pertes de chargesadmissibles, Taux de vaporisation)
- Flexibilité imposée
- Type d'écoulement lié au fluide
- Emplacement disponible dans l'unité
- Technologie particulière à certains procédés
- Cout de l'investissement
- Cout d'exploitation
- Type de combustibles
- Expérience dans des domaines similaires

II.7 Constitution d'un four :

a. Faisceau tubulaire :

Les faisceaux tubulaires sont généralement constitués de tubes droits, sans soudure, reliés entre eux :

- Par des coudes à 180° soudés sur les tubes
- Par des liaisons spéciales, appelées boites de retour, comportant un ou deux orifices fermés par des bouchons. Ces dispositifs permettent l'observation et le nettoyage de l'intérieur des tubes

Les dimensions les plus courantes des tubes de four sont indiquées dans le tableau suivant :

Diametre exterieur

Pouces	**1,9**	**2,375**	**2,875**	**3,5**	**4**	**4,5**	**5,563**	**6,625**	**8,625**	**10,75**
mm	48,3	60,3	73	88,9	101,6	114,3	141,3	168,3	219,1	273

Epaisseur moyenne

Pouces	**0,145**	**0,154**	**0,203**	**0,216**	**0.226**	**0,237**	**0,258**	**0,280**	**0,322**	**0,365**
mm	3,68	3,91	5,16	5,49	5,74	6,02	6,55	7,11	8,18	9,27

Tableau II.2 : Dimensions les plus courantes des tubes de four

b. Matière des tubes :

Le choix du matériau pour les faisceaux des tubes repose sur les critères suivants :

- Résistance à la corrosion par le fluide chauffé
- Résistance à l'oxydation par les fumées chaudes
- Résistance mécanique en température :

✓ à la pression intérieure du fluide chauffé
✓ aux contraintes mécaniques dues au poids du faisceau tubulaire et dufluide qu'il contient.

Les matériaux les plus usités sont indiqués dans le tableau II.3 avec la températuremaximum d'emploi pour la résistance à l'oxydation par les fumées.

		Type suivant AISI Etat unis	Désignation suivant normes françaises AFNOR	Température limite d'emploi
Acier au carbone			TU42F	480
Acier allies a	1.25% Cr-0.5% Mo 2.25% Cr-1% Mo 5% Cr-0.5% Mo 9% Cr-1% Mo		TU 10 CD 5-05 TU 10 CD 9-10 TUZ 12 CD 05-05 TUZ 10 CD 09	600 635 650 700
Acier inoxydable 18cr-8Ni	18 Cr – 8 Ni 18 Cr – 8 Ni - Ti 18 Cr – 8 Ni - Cb 18 Cr – 8 Ni - Mo	304 321 347 316	Z6 CN 18 - 10 Z6 CNT 18 - 10 Z6 CN Nb 18 - 10 Z6 CN 17 - 12	870 870 870 870
Acier réfractaire forges	35 Ni 20 Cr 43 Fe [alliage 800 H] 72 Ni 15 Cr 8 Fe [alliage 600]			985 1 100
Acier réfractaire mouler par centrifugation	25 Cr 20 Ni (HK 40) 35 Ni 25 Cr Nb			1 100 1 100

*Dans les four les grades H sont généralement utilises car le contrôle de la teneur en carbone périmètre d'obtenir une meilleur résistance mécanique à température élever

Tableau II.3 : Matières des tubes les plus couramment utilisés et les températures d'emplois[10]

c. Supportages des faisceaux tubulaires

La libre dilatation des éléments du faisceau tubulaires est à la base des principes dusupportage.

Les matériaux utilisés doivent résister :

- Aux fumées
- A l'oxydation
- A la corrosion par les cendres de combustibles liquides (vanadates,sulfates….)

Dans certains cas, on utilise des métaux peu ou pas alliés, mais ils sont alors protégés de l'action des fumées (températures, oxydation) par un garnissage réfractaire. C'est notamment le cas des supports d'extrémités dans les zones de convection.

II.8 Garnissage des parois du four :

L'enveloppe des fours (chambre de combustion, zone de convection, cheminée) est constituée d'une paroi métallique revêtue intérieurement d'un garnissage isolant et réfractaire.

Les propriétés requises pour un garnissage isolant réfractaire sont variées :

- Conductivité thermique faible
- Température pyroscopique élevée
- Résistance mécanique élevée
- Bonne résistance à la variation de température
- Facilité de mise en œuvre

Ces propriétés sont contradictoires et la sélection d'un matériau pour une application particulière est le résultat d'un compromis. Dans certain cas, c'est un garnissage multicouche qui permettra d'allier les propriétés opposées de plusieurs matériaux.

II.9 Types de garnissage :

❖ Charpente métallique et casing :

Elle constitue l'enveloppe et la structure métallique qui doit supporter :

- ✓ Les charges gravitaires des divers éléments constituant le four (faisceaux,réfractaires, bruleurs, etc…..)
- ✓ Les efforts thermiques amenés par le serpentin et les tuyauteries deraccordement
- ✓ Les effets du vent et effets sismiques éventuel
- ✓ Les structures métalliques sont des éléments auto-stables assemblés parboulonnage et soudure
- ✓ Le casing est un élément qui doit être le plus étanche possible afin d'éviterdes entrées d'air parasites nuisant à la bonne combustion.
- ✓ Ce facteur est d'autant plus important que les fours fonctionnent avec faible excès d'air.

❖ **Revêtements réfractaires :**

Les fours sont garnis intérieurement de matériaux réfractaires isolants afin de protéger le casing et les structures métalliques des effets de la température et de limiter les pertes thermiques par les parois.

Compte tenu du cout de combustible de plus en plus important, cette isolation a été améliorée et la température de casing est abaissée à 70℃ environ et les pertes thermiques sont abaissées de 1.2% à 2 %.

Principaux types de revêtement :

- ✓ Briques isolants réfractaires et blocs isolants
- ✓ Béton isolant réfractaire en monocouche ou multicouche
- ✓ Matériaux isolants : ils se présentent généralement sous forme deplaques destinées à constituer des panneaux pour être placés derrière les briques ou béton.

a) Briques réfractaires :

❖ Ce type de garnissage permet d'obtenir une bonne isolation par la présence de blocs isolants pouvant résister jusqu'à 1000 ℃ tout en présentant réfractivité grâce aux briques isolants réfractaire pouvant résister à plus de 1400 ℃.

❖ La conductibilité thermique du bloc est de l'ordre de 0.09 kcal/h m ℃ à 500

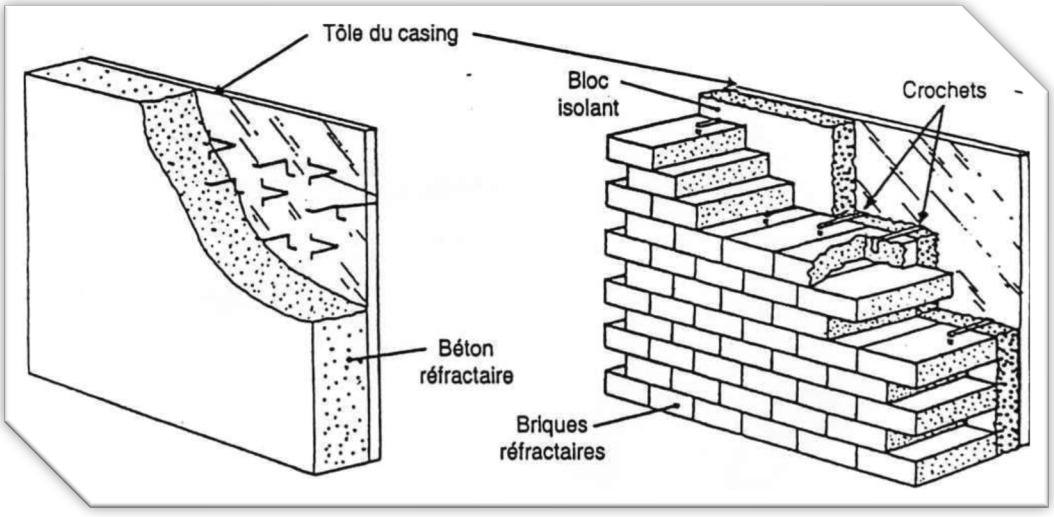


Figure II.11 : Schéma montrant des exemples d'encrage au casing de béton et briques réfractaires.

b) Béton isolant réfractaire :

- Ces bétons sont des mélanges de liants hydrauliques et d'agrégats de différentes qualités et constituant une maçonnerie monolithique
- Dans le cas d'un béton isolant du type 1-2-4 qui est le plus couramment utilisé, il faut mélanger : 1 volume de ciment + 2 volumes d'agrégats+4 volumes vermiculite (produit isolant fabriqué à partir du mica expansé).
- Les épaisseurs usuelles sont :
  - ✓ De 5 pouces (environ 13 cm) pour l'isolement de la zone deconvection
  - ✓ De 6 à 8 pouces (15 à 20 cm) pour la zone de radiation.

c) Fibre céramique :

- Le revêtement est réalisé à l'aide de fibres en nappes, d'épaisseur et de densité variables en fonction de la température.
- Les revêtements réfractaires fibreux présentent les avantages suivants :
  - ✓ Faible conductibilité thermique
  - ✓ Facteur de rayonnement élevé
  - ✓ Faible poids
  - ✓ Faible accumulation de chaleur à l'équilibre thermique
  - ✓ Excellente résistance aux chocs thermiques ; flexibilité etrésilience
  - ✓ Facile à découper et à installer.
- Cependant, elles n'ont pas l'étanchéité des réfractaires classiques.

	Fibre A	**Fibre B**
Couleur	Blanche	blanche
Masse spécifique Moyenne	0.13	0.17
Chaleur spécifique en m th / kg. ^{0}C a 20^{0}C	0.84	0.92
Température limiter d'emploi conseillée en atmosphère oxydante	1200^{0}C	1420^{0}C
Température de fusion	1760^{0}C	1800^{0}C
Composition chemique moyenne		
Al_2O_3	47%	60%
SIO_2	54%	38%
Fe_2O_3	0.2	0.1
$K_2O + Na_2O$	0.3	0.4
Stabilité chemique	Excellente	Excellente
Conductibilité thermique (W/m.K)		
à 500^{0}C	0.06	0.13
à 700^{0}C	0.12	0.17
à 900^{0}C	0.18	0.23
à 1100^{0}C	0.25	0.32

Tableau II.4 : Propriétés des fibres céramiques

II.10 Description du four F501 :

- Bruleurs situés sur la sole du four réalisant le mélange air-combustible et la combustion.
- Les flammes se développent dans la zone de radiation dans laquelle les tubes sont chauffés par rayonnement
- Au sommet de la zone de radiation, la température des gaz de combustion est de l'ordre de 700°C à 800 °C et de ce fait le rayonnement est plus faible.
- La récupération de chaleur sur les fumées est poursuivie dans la zone de convection fonctionnant comme un échangeur tubulaire.
- Les fumées refroidies sont rejetées à l'atmosphère par l'intermédiaire de la cheminée.
- Au cours de son trajet dans le faisceau tubulaire, le fluide de procédé parcourt successivement les zones de convection et de radiation.
- Si pour obtenir une puissance thermique élevée plusieurs bruleurs sont nécessaires, ceux-ci sont disposés sur un cercle centré sur l'axe du four.
- Selon la puissance thermique du four les dimensions des zones de radiation varient entre 1.5 m et 13 m de diamètre avec des hauteurs allant de 2.5 m à 25 m
- Puissances thermiques de l'ordre de 70 000 th/h ce qui correspond à la combustion d'environ 7 tonnes/h de combustible.

Figure II.12 : Photo de la raffinerie de Sidi-Ercine Alger

II.11 Géométrie du Four

La structure de four se compose :

- ✓ **Radiant sections :**

  (L= 20.5 m, W =5.2 m, H= 14 m)

- ✓ **Convection sections:**

  (L= 3.95 m, W= 3.95 m, H= 7m)

- ✓ **Breeching :**

  (H= 1.5 m)

- ✓ **Stack :**

  (d= 2.89 m, H= 36.38 m)

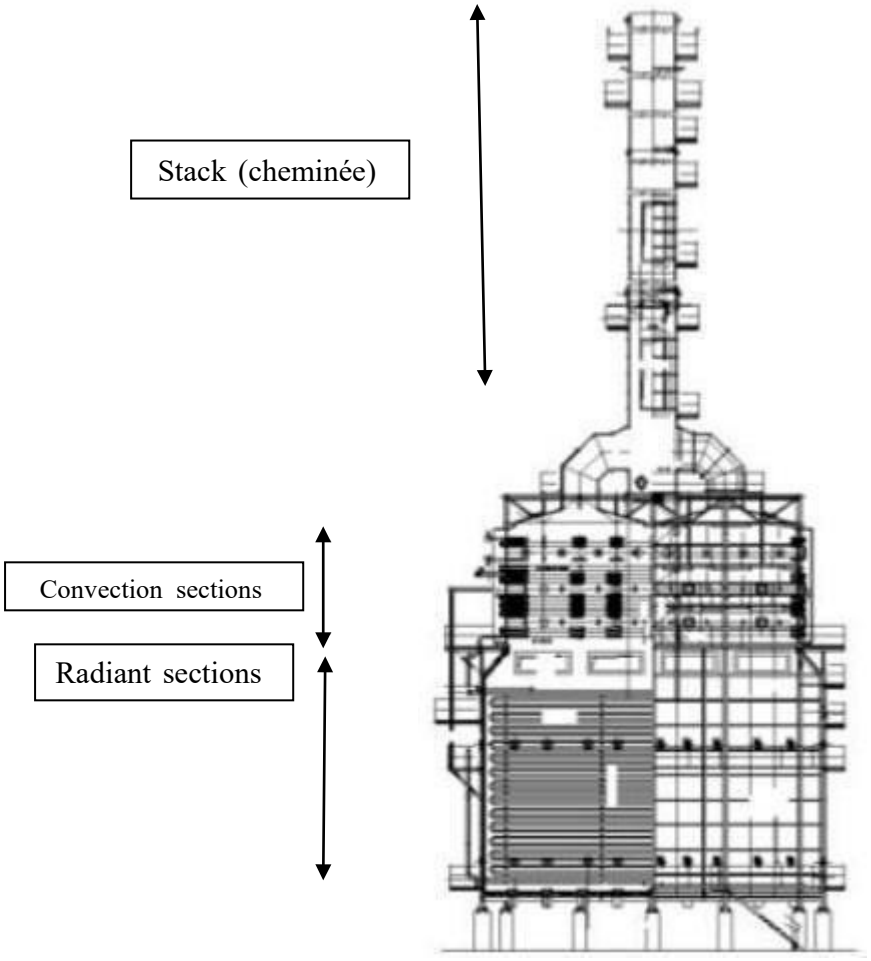


Figure II.13 : Disposition générale du four

Chapitre III : Calcul et amélioration du rendement d'un four

Chapitre III : Calcul et amélioration du rendement d'un four

III.1Introduction :

Le rendement des fours des installations pétrolières et gazières tient une place capitale dansles paramètres de choix des équipements

La notion du rendement d'un four apparait par le fait que le débit de chaleur libérée aux bruleurs par la combustion n'est pas intégralement transmis au fluide procédé.

La détermination du rendement de four est particulièrement importante car il conditionne la consommation de combustible. Il explique à lui seul une grande partie de l'évolution des fours dont la conception est largement influencée par le prix de combustible.

III.2 Généralités sur la combustion :

La combustion est une réaction chimique entre un corps combustible (liquide ou gaz) et uncorps comburant (l'oxygène). Elle est accompagnée d'un important dégagement de chaleur.

La combustion dans les fours pétroliers classiques se fait dans une chambre appelée également zone de rayonnement. Les faisceaux absorbant en radiation étant disposé le long des murs réfractaires 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 de bruleurs à pulvérisation de vapeur capable de bruler des combustibles liquides et gazeux aux caractéristiques différentes.

Les combustibles pétroliers sont composés essentiellement d'hydrocarbures et de composés soufrés, c'est-à-dire de trois éléments simples de base : carbone, hydrogène, soufre.

La quantité de chaleur dégagée dépend de la teneur en ces trois éléments dans le combustible.

Equation de la combustion :

$$\text{Combustible comburant} + \text{Oxygène} \xrightarrow{\text{Energie d'activation}} \text{Gaz} + \text{fumées} + \text{chaleur} + \text{lumière}$$

Ⅲ. 3Réaction de combustion :

Connaissant la composition des combustibles, l'excès d'air imposé et le taux de la vapeur de pulvérisation des bruleurs, nous résoudrons l'équation de réaction afin de déterminer la composition des gaz prévenant de la combustion pour :

a. Dimensionner le four
b. Dimensionner les carneaux et la cheminée
c. Evaluer la quantité de produits agressifs libérée.

Le terme de combustion s'applique à l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent au cours de l'oxydation complète ou partielle d'un combustible. La combustion complète d'un hydrocarbure conduit à la formation de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone, et peut être représentée par une réaction globale du type :

$$C_nH_m + (n + \frac{m}{4})\, O_2 ==== n\, CO_2 + \frac{m}{2} H_2O + Q$$

En réalité, le processus de combustion ne peut être décrit par cette seule réaction globale. En effet, l'oxydation d'un hydrocarbure s'effectue suivant des mécanismes réactionnels complexes constitués de réactions en chaines ramifiées, faisant intervenir un grand nombre d'espèces chimiques intermédiaires. Donc, la combustion est un phénomène complexe, qui se développe sous des conditions d'inflammabilité et de propagation.

La combustion résulte de réactions chimiques globalement exothermiques, c'est-à- dire qu'elles dégagent de la chaleur, par exemple la combustion du mélange H_2-O_2 qui produit de l'eau H_2O avec un fort dégagement de chaleur, ainsi elle apparait le plus souvent sous la forme d'une flamme, constituée par le volume gazeux dans lequel s'effectuent les réactionsd'oxydation.

Les réactions de la combustion :

$$CH_4 + 2\,O_2 \longrightarrow CO_2 + 2\,H_2O + Q_1\ (kcal/h)$$

$$C_2H_6 + \frac{7}{2}O_2 \longrightarrow 2\,CO_2 + 3\,H_2O + Q_2\ (kcal/h)$$

$$C_3H_8 + 5\,O_2 \longrightarrow 3\,CO_2 + 4\,H_2O + Q_3\ (kcal/h)$$

$$iC_4H_{10} + \frac{13}{2} \longrightarrow 4\,CO_2 + 5\,H_2O + Q_4\ (kcal/h)$$

$$nC_4H_{10} + \frac{13}{2}O_2 \longrightarrow 4\,CO_2 + 5\,H_2O + Q_5\ (kcal/h)$$

$$iC_5H_{12} + 8\,O_2 \longrightarrow 5\,CO_2 + 6\,H_2O + Q_6\ (kcal/h)$$

$$nC_5H_{12} + 8\,O_2 \longrightarrow 5\,CO_2 + 6H_2O + Q_7\ (kcal/h)$$

Les principales réactions des combustions neutres sont données ci-dessus, avec une température de référence de 0 ℃

Ces réactions permettront de déterminer la quantité d'air nécessaire au bruleur ainsi que la composition et la quantité de fumées sèches et humides produites à partir d'un combustible déterminé.

III.4 Composition théorique des fumées :

La composition théorique des fumées s'exprime en pour-cent volume ou en pour- cent poids.

On obtient ces valeurs à partir du nombre de molécules des constituants que l'on détermine à l'aide des équations de réactions.

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

Produits Agressif	M	N^{bre} de moles	% Volumique	Poids (Kg/Kg)	Volume (Nm^3/Kg)
CO_2	44	n_1	n_1/N	$44n_1 \times 10^{-3}$	$0{,}0224n_1$
SO_2	64	n_2	n_2/N	$64n_2 \times 10^{-3}$	$0{,}0224n_2$
N_2	28	n_3	n_3/N	$28n_3 \times 10^{-3}$	$0{,}0224n_3$
O_2	32	n_4	n_4/N	$32n_4 \times 10^{-3}$	$0{,}0224n_4$
H_2O	18	n_5	n_5/N	$18n_5 \times 10^{-3}$	$0{,}0224n_5$
Total		N	100	$\sum PM_in_i$	$\sum 0{,}0224n_i$

Tableau III.1 : Les principaux constituants de fumées humides

Poids spécifique fumées (kg/Nm^3) = $(\sum PM_in_i \times^* 10^{-3} / \sum 0.0224\ n_i)$……(III.1)

Volume spécifique fumées (Nm^3/kg)= (1/ Poids spécifique fumées)

$= (\sum 0.0224\ n_i / \sum PM_in_i \times^* 10^{-3})$……(III.2)

III.5 Teneur théorique en produits agressifs :

Aujourd'hui la réglementation sur la pollution atmosphérique impose la connaissance de la teneur des fumées en produits agressifs.
Les principaux produits agressifs contenus dans les fumées produites par les combustibles utilisés sont le CO_2, le SO_2 et le NO.
Les valeurs spécifiques de ces constituants sont données en tête du tableau ci- contre.

III.6 Polluants émis par les fours :

Les installations de combustion et de production de chaleur et d'énergie comme les chaudières, les fours ont particulièrement par leurs rejets dans l'atmosphère un impact sur l'environnement. Ils rejettent plusieurs types de polluants :

- Les oxydes de soufre (SO2 et SO3) formés à partir du soufre contenu dans certains combustibles (fioul, gaz de cokerie, etc.) ;

- Les oxydes d'azote (NO, NO2, N_2O) formés au cours de combustion soit à partir des composes azotes contenus dans le combustible soit, par combinaison à haute température de l'azote et de l'oxygène de l'air.

- Les poussières en provenance du combustible ou de particules solides en provenancedes produits chauffés, entrainées par les fumées ;

- L'oxyde de carbone (CO) dans les fours ou la combustion s'effectue avec un défautd'air.

Dans les installations plus spécifiques on peut trouver également des composés de fluor, de chlore, des COV (composés organiques volatils), des HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), etc. ; et sauf si le combustible est de l'hydrogène pur, on trouve dans les fumées du dioxyde de carbone (CO_2) qui bien que n'étant pas un polluant au sens strict du terme, a un impact sur le climat par l'effet de serre qu'il entraine

.

III.7 Chaleur de réaction :

Les réactions chimiques de combustion conduisent à un dégagement de chaleur plus ou moins important selon la nature du combustible.
Pour quantifier cela, on a définit la **chaleur de réaction** qui est la quantité de chaleur libérée par la combustion d'une mole de combustible.
Cette définition exige le choix d'une pression de référence qui est généralement la pression atmosphérique normale et également celui d'une température de référence à laquelle se trouvent les réactifs (combustible+ oxygène) avant combustion et jusqu'à laquelle seront refroidies les fumées. Cette température de référence est le plus souvent 0 °C.

III.8 Le pouvoir calorifique :

Le pouvoir calorifique est la traduction industrielle de la chaleur de réaction ou enthalpie.
On appelle pouvoir calorifique la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de 1kg

de combustible solide ou liquide ou de 1 m^3 de combustible gazeux, le combustible et le comburant (en général l'air) étant pris à une température et une pression de référence, et les produits de la combustion ramenés à la même température. L'écart relevé entre les valeur d'un pouvoir calorifique estimé aux températures de référence de 0 °C et 25 °C étant généralement négligeable par rapport aux erreurs commises sur la détermination du pouvoircalorifique, dans la pratique industrielle on néglige ce terme correctif et l'on parle de pouvoirs caloriques déterminés à température ordinaire sous la pression atmosphérique c'est-à-dire 1 atm (soit 101325 Pa= 1,013 bar).

Il est exprimé en générale en kilojoules par kilogramme (noté kJ/kg), mais on rencontre également le pouvoir calorifique molaire (en kilojoules par mole, kJ/mol) ou le pouvoir calorifique volumique(en kilojoules par litre, kJ/L). Pour le gaz naturel, il est exprimé en kilowatts-heures par normo mètre cube (noté kWh/Nm^3). Néanmoins, suivant le domaine d'application, on peut l'exprimer dans d'autres unités plus pratiques, par exemple, en kWh/m^3 pour le gaz ou KWh /litre pour le fuel.

Pour les combustibles contenant de l'hydrogène il est nécessaire de distinguer :

- **Le pouvoir calorifique supérieur (P.C.S)** pour lequel l'eau formée est supposée à l'état liquide, c'est la quantité de chaleur exprimée en kilocalories, dégagée par la combustion à pression constante de 750 mm Hg de 1 kg ou 1 normal mètre cube d'un combustible à la température de 0°C. [12]

- **Le pouvoir calorifique inferieur (P.C.I)** pour lequel l'eau formée est supposée à l'état vapeur, c'est la quantité de chaleur dégagée dans les mêmes conditions que le PCS, mais en admettant que la vapeur prévenant de la réaction n'est pas condensée. Le P.C.S est donc supérieur au P.C.I de la chaleur de condensation à 0°C de l'eau formée par la combustion de l'hydrogène du combustible. [12]

Les deux valeurs sont liées pour les gaz et les liquides par les relations respectives suivantes en négligeant la concentration du mélange combustible et comburant : [13],[11]

PCI=PCS – 10,9 n pour les gaz n = nombre de moles H_2O.

PCI = PCS – 53 H pour les liquides H = % poids de l'hydrogène du combustible.

III.9 Pouvoir calorifique d'un mélange :

Soit par exemple, un gaz contenant :

14% de CO_2 10% de CO 30% de H_2 40% de CH_4 6% de N_2

Son pouvoir calorifique supérieur sera égale à :

3066.10+ 3071 * 0.30 +9490 * 0.40 = 5024 kcal/ m^3

III.10 Pouvoir comburivore :

Le volume d'air nécessaire à la combustion est appelé .

Il s'exprime en Nm^3 d'air par kg de combustible ou encore de Nm^3 dans le cadre de combustibles gazeux. Il s'exprime en m^3/kg ou en m^3/ m^3.

Les valeurs des pouvoirs comburivores de quelques corps purs sont données sur le tableau

Combustible	Equation chemique de combustion	CH	ETAT PHYSIQUE		CHALEUR DE REACTION	POUVOIR CALORIFIQUE		POUVOIR COMBURIVOR	
			DU COMBUS.	EAU FORMEE		Kcal/Kg	Kcal/Nm³	Nm³ air/Kg	Nm³ Air/Nm³
Carbone	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	.	S	.	94,05	7840	.	8,90	.
Carbone	$C + ½ O_2 \rightarrow CO$	.	S	.	26,45	2205	.	4,45	.
Oxyde de carbone	$CO + ½ O_2 \rightarrow CO_2$	.	G	.	67,6	2413	.	1,91	2,39
Hydrogène	$H_2 + ½ O_2 \rightarrow H_2O$	.	G	V/L	57,7 / 68,5	28604 33975	2575 3060	26,50	2,39
Soufre	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	.	L	.	70,7	2205	.	3,33	.
Hydrogène sulfure	$H_2S + 3/2 O_2 \rightarrow SO_2+H_2O$	.	G	V/L	123,9 / 134,7	3635 3955	5530 6015	4,70	7,16
Méthane	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2+2H_2O$	3	G	V/L	191,8 / 213,8	11960 13300	8565 9520	13,32	9,54
Ethane	$C_2H_6 + 7/2 O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$	4	G	V/L	341,4 / 373,6	11355 12125	15240 16680	12,44	16,70
Propane	$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2+4H_2O$	4.5	G	V/L	488.7 / 531.7	11085 12060	21815 23735	12,12	23,85
n-Butane	$nC_4H_{10} +13/2 O_2 \rightarrow 4CO_2+5H_2O$	4.8	G	V/L	635.6 / 689.3	10935 11860	28375 30770	11,95	31,01
n-Hexane	$nC_6H_{14}+19/2O_2 \rightarrow 6CO_2+7H_2O$	5.14	L	V/L	921.6 / 996.9	10695 11570	. .	11,78	.
cyclohexane	$C_6H_{12}+9O_2 \rightarrow 6CO_2+6H_2O$	6	L	V/L	874.1 / 938.6	10385 11155	. .	11,43	.
benzene	$C_6H_6 +15/2 O_2 \rightarrow 6CO_2+3H_2O$	12	L	V/L	749.5 / 781.8	9595 10010	. .	10,26	.
n-Hexadecane	$nC_{16}H_{34}+49/2O_2 \rightarrow 16CO_2+17H_2O$	5.65	L	V/L	2377.7 /2560.5	10500 11310	. .	11,56	.

Tableau III.2 : valeurs des pouvoirs comburivores de quelques corps purs. [15]

Dans le cas de mélange, le pouvoir comburivore dépend de la composition de combustible. On peut admettre que l'air se compose, en volume, de 21% d'oxygène et de 79 % d'azote.Cherchons le pouvoir comburivore de l'hydrogène : pour bruler 1 m^3 de H_2, il faut 0.5 m^3 d'oxygène, soit : [15]

$$\frac{0.5*100}{21} = 2.38 \text{ m}^3 \text{ d'air}$$

P_c : Le pouvoir comburivore de l'hydrogène est 2.38 Nm^3air/Nm^3.

III.11 Les différents types de la combustion :

a. Combustion stœchiométrique

Combustion stœchiométrique aura lieu lorsque la quantité d'oxygène introduite dans le réacteur est exactement égale à la quantité nécessaire à une combustion totale du méthane CH_4 dans ces conditions, les produits de la combustion complète sont essentiellement le dioxyde de carbone, l'azote et la vapeur d'eau.

Voici exemple de l'équation de combustion de méthane :

$$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O + \text{énergie}$$

b.Combustion complète

Lors d'une combustion complète, le réactif réagira avec le comburant jusqu'à former des produits qui ne pourront plus être oxydés avec le comburant : les produits ont atteint un degré de stabilité qu'une réaction de combustion ne peut se modifier.

Dans le cas d'un hydrocarbure réagissant avec le dioxygène, les produits de combustion sont le dioxyde de carbone un produit de combustion stable, ainsi une combustion complète fournit les mêmes produits de réactions quels que soient les réactifs. Une combustion complète permet d'obtenir la quantité maximale d'énergie disponible étant le pouvoir calorifique.

c. Combustion incomplète :

On dit qu'une combustion est incomplète lorsqu'en raison de conditions défavorables (mélange non homogène, température insuffisante), une partie du gaz ne participe pas à la combustion et ce, quel que soit le facteur d'air. Cette combustion se caractérise par la présence simultanée d'oxygène et d'imbrulés, notamment du monoxyde de carbone CO dans les produits de combustion.

III.12 Les combustibles:

Il existe plusieurs types de combustibles :

a. Combustibles solides :

Un combustible solide est combustible sous forme solide notamment le bois, palettes de bois et charbon.

Dans les raffineries, ils utilisent les charbons ou le coke de pétrole (généralement sous forme pulvérisé), mais aussi les déchets divers.

Tous les combustibles solides sont issus de la biomasse (plantes).

b. Combustibles liquides :

Un combustible liquide est un composé liquide susceptible de s'unir à un oxydant (dioxygène de l'air) et capable de se consumer.

L'origine du pétrole est analogue à celle du charbon ; des débris d'organismes vivants tombés au fond d'une lagune et mis ainsi à l'abri d'une décomposition rapide par les agents atmosphériques. Les débris animaux, soumis à l'action chimique des bactéries anaérobies ainsi qu'aux fortes pressions des terrains qui les couvrent, donnent naissance aux hydrocarbures liquides ou gazeux.
Dans les raffineries, ils utilisent le fuel lourd, le gazole, et le naphta

c. Combustibles gazeux :

- ✓ Gaz naturelle
- ✓ Gaz fabriqués à partir de la houille
- ✓ Fabrication directe de gaz à partir du charbon
- ✓ Gaz fabriqué d'origine pétrolière
- ✓ Gaz de pétrole liquéfié G.P.L
- ✓ Mélange de gaz

Dans les raffineries, ils utilisent le gaz naturel, mais aussi le gaz de cokerie, le gaz de raffinerie et le gaz à haut fourneaux.

Le tableau ci-dessous montre la composition chimique du gaz naturel Algérien :

Composants gaz naturel (Gaz Algérien)	POURCENTAGE (%)
CH_4	**87.4**
C_2H_6	**8.4**
C_3H_8	**2.6**
C_4H_{10}	**0.8**
C_5H_{12}	**0.1**
N_2	**0.7**

Tableau III.3 : La composition chimique du gaz naturel Algérien

III.13 Conditions nécessaires à la combustion:

La combustion ne peut avoir lieu que si sont réunis : C , C et

C'est ce qu'exprime le triangle de feu évoqué dans le domaine de sécurité.

Conditions à réunir pour obtenir une combustion de qualité sur un bruleur sont résumées par la règle T :

✓ **Turbulence :**

Exprime la réalisation d'un mélange intime entre le combustible et l'air obtenu dans la distribution de ces fluides dans le bruleur.

Elle peut être accentuée par des dispositifs propres à chaque bruleur : rosace, ventelles de turbulence.

Dans le cas des bruleurs de paroi des fours de vapocraquage, l'air et les combustibles gazeuxsont mélangés préalablement à leur introduction dans la chambre de combustion.

✓ **Température :**

La température signifie essentiellement l'énergie nécessaire à l'inflammation du mélange.

Cette énergie initialement fournie par un dispositif d'allumage est régulièrement apportée en fonctionnement établi par recirculation de gaz chauds au nez de bruleur ou par le rayonnement des pièces de réfractaire constituant l'ouvreau

Une température plus élevée dans la chambre de combustion obtenue par préchauffage de l'air active le processus de réalisation de la flamme (flammes plus courtes) et les transferts thermiques.

✓ **Teneur en oxygène :**

Elle exprime la nécessité de réaliser la combustion avec un excès d'air pour qu'elle soit complète.

L'excès d'air a pour inconvénient de réduire le rendement du four, une partie de la chaleur de combustion étant utilisée pour réchauffer l'air en excès de la température ambiante à la température de rejet des fumées.

L'importance de l'excès d'air nécessaire à la combustion complète dépend en particulier de l'aptitude de bruleur à réaliser le mélange intime air- combustible : plus grande est la turbulence, plus faible est l'excès d'air nécessaire.

✓ **Temps :**

C'est le temps mis par la combustion pour se dérouler conditionne la longueur de la flamme.

Si la combustion est très rapide à l'échelle moléculaire, le temps est essentiellement contrôlépar le processus de réalisation du mélange air- combustible. Sur un bruleur donné la combustion est plus rapide et la flamme plus courte en cas d'utilisation d'air préchauffé ou d'excès dari plus grand.

✓ **Ténuité :**

Cas d'un combustible liquide, exprimant la finesse de la pulvérisation.

III.14 Echanges thermiques dans les zones du four:

Les échanges thermiques à l'intérieur du four se font à la fois par les trois mécanismes de la radiation, de la convection et de la conduction. Les produits de la combustion cèdent leur chaleur aux tubes par radiation et convection ; à travers les parois de tubes, le transfert se fait par conduction ; à l'intérieur des tubes c'est la convection qui intervient de nouveau ; enfin,les pertes calorifiques à travers les murs du four se font par conduction.
Les phénomènes les plus importants à prendre en considération est la radiation et la convection.

- **Zone de radiation :**

Le transfert de chaleur par radiation à partir d'une surface est régipar l'équation de Stefan-Boltzmann : 19

$$q_r = \sigma T^4 \quad \text{(III.3)}$$

q_r = flux de chaleur par radiation (W/m^2)

σ= constante de Stefan-Boltzmann= 5.67 x 10 ($W/m^2 K^4$)

T= température de la surface (K)

Pour l'échange de chaleur entre les gaz de combustion et les tubeschauds, l'équation peut s'écrire :

$$Q_r = \sigma . (\alpha . Acp) . F . (Tg^4 - T^4 t) \quad \text{(III.4)}$$

Acp : Surface « plan froid » des tubes (nombre de tubes× longueur exposée ×nombre de passe)

α =facteur d'efficacité d'absorption

F= facteur d'échange de rayonnement

T_g= température des gaz chauds (K)

T_t= température de surface du tube (K)

Le facteur d'échange de rayonnement dépend de la disposition des surfaces de leur émissivité et leur absorptivité. Pour un four le facteur d'échange dépend de la pression partielle et de l'émissivité de ces gaz ainsi que la disposition du réchauffeur. La pression partielle dépend du type de combustible utilisé.

Le rayonnement des flammes éclairantes dépend de la quantité de matière solide déposée dans la flamme, généralement du Carbonne, qui est chauffée jusqu'à incandescence, conférant à la flamme son éclat. En conséquence, le manque de connaissances précises concernant des gaz et des flammes est encore plus grand.

- **Zone de convection :**

Le flux local de transfert thermique par convection entre une surface et un fluide est donné par la relation de Newton : [19]

$Q = h\ A\ (T_{surface} - T_{fluide})$..... (III.5)

h = coefficient de transfert convectif (W/m^2

A =surface d'échange (m^2)

$T_{surface}$ = température de la

T_{fluide} =température du fluide

Les gaz de combustion s'écoulent à travers les dans la section de convection. Le coefficient global dépend de la vitesse et de la température du gaz, ainsi que la taille des tubes.

Les valeurs typiques vont de 20 à 50 W/m^2 ℃ sachant que le coefficient de transfert de chaleur du côté gaz sera faible et lorsque des surfaces étendues sont utilisées, il faut tenir compte de l'efficacité de l'ailette.

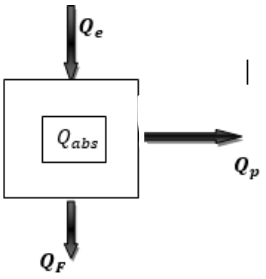
III.15 Rendement du four :

En quelques mots , le rendement de notre four « » sera calculer par la formule si dessous , c'est le rapport entre la quantité de chaleur absorb e par le brut (Q absorb e) et la quantité de chaleur fourn (Q entrée) au four par la combustion , dans le cas où l'on souhaiterait lire le résultat en pourcentage , il convient ensuite de multiplier le résultat obtenu par 100

$$Rendement\ (\%) = (Q\ absorbée\ /\ Q\ entrée) \times 100 \ldots \textbf{(III.6)}$$

III.16 Bilan thermique :

Pour pouvoir déterminer le rendement du four, il faut faire un bilan thermique

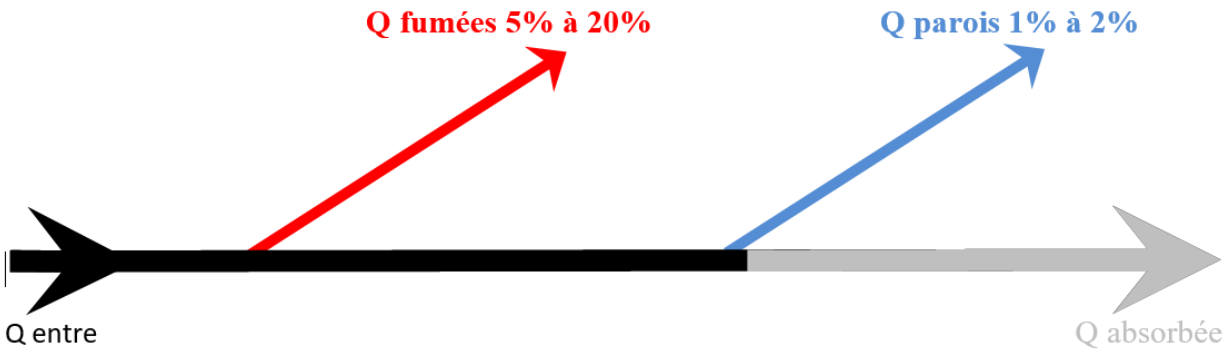


$$Q_e - Q_{abs} = Q_p + Q_f$$

Figure III.1 : Le bilan thermique

III.17 Pertes thermiques :

.



Le bilan thermique du four s'exprime

Q entre = Q absorbée + Q fumées + Q parois

Figure III.2 : pertes thermiques du four

a. Pertes aux parois (Q_p)

- Dues aux imperfections de l'isolation thermique par les matériauxréfractaire
- Dans le cas de fours récents de grandes puissances, elles représentent 1% à 2 % de la chaleur libérée aux bruleurs (Q entrée).
- Elles peuvent être beaucoup plus importantes dans le cas de fours anciensdont le réfractaire est défectueux

b. Pertes aux fumées (Q_f)

Qui évacuent à l'atmosphère un débit de chaleur relativement important. Elle représente entre 5 à 20 % de la chaleur libérée aux bruleurs.

III.18 Calcul du rendement du four :

a. Calcul du volume de fumées stœchiométrique :

C'est le cas idéal, ne jamais réaliser en pratique, ou la quantité d'air est juste suffisante pourque tout le carbone s'oxyde en CO_2 et tout l'hydrogène en H_2O+ SO_2.

Un gaz contenant plusieurs hydrocarbures (cas du gaz naturels) peut se ramener à une mole équivalente de formule C_nH_m. La combustion stœchiométrique s'écrit :

$$C_nH_m + x(O_2+3{,}8N_2) \Rightarrow nCO_2 + m/2\ (H_2O) + 3{,}8\ xN_2$$

Avec :

$x = n + m/2$

Volume stœchiométrique d'air : $V_a = (n + m/4)$

Volume stœchiométrique de fumées : $V_f = 4.8\ n + 5.8\ (m/4)$

On considère que le gaz naturel contient 87,4% de CH_4, 8,4% de C_2H_6, 2,6 % de C_3H_8 et des traces de C_4H_{10}, C_5H_{12} et de N_2

Ce qui donne un volume stœchiométrique de fumées égale à **11,47 m^3/ m^3 de GN**

b. Cas avec excès d'air :

complète.

En effet, les bruleurs n'assurent qu'un mélange imparfait de l'air et du gaz, et ainsi une partie de l'air échappe à la réaction, l'air étant insuffisant pour assurer l'oxydation complètedu carbone et de l'hydrogène.

L'excès d'air permet de pallier le défaut de mélange. La réaction s'écrit :

$$C_nH_m + x\ (1 + \ \ )\ (O_2 + 3{,}8\ N_2) \Rightarrow nCO_2 + m/2\ (H_2O) + 3{,}8\ x\ (1 + \ \ )\ N_2 + \ \ x\ O_2$$

On retrouve de l'oxygène dans les fumées, un excès d'air de 10 à 20 % est en général recommandé , dans notre cas à la sort des fumé s la présence d'oxygéne est très élev il peut atteindre 40%

$V_f = V_{fs} + (V \ * \ /100)$ L

Le volume des fumées est estimé :

V_f= 12.31 m^3 /m^3 de GN à un excès d'air estimé de 38%

Ce paramètre qu'en a calcul est très import nt pour connaitre la valeur de la chaleur des fumées **Q fumées** et en finiras par suite de calculer le rendement du four , mais il est nécessaire de commencer par calculer les paramètre suiv nt :

- **Q entré** : ce qui est possible en mesurant les débits et caractéristiquesdes combustibles.
- **Q absorbé** : ce qui est souvent très facile surtout quand il y a vaporisation ou réaction chimique dans le faisceau tubulaire.

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

$$\textit{Q absorbé = Q entré – Q fumées – Q parois}$$

$$\eta = ((Q\ entré - Q\ fumées - Q\ parois)/ Q\ entré) \times 100$$

Il reste à :

- Estimer Q pertes par les parois car ce poste est très difficilement mesurables par l'expérience du constructeur.

- Déterminer Q fumées qui dépend : du débit des fumées, de la chaleur spécifique de composition des fumées et de la température des fumées.

L'évaluation des performances d'un four nécessite la connaissance et la maitrise desflux entrants et sortants (matières et chaleur).

C'est dans ce but que nous allons procéder à un bilan thermique du four

✓ **Chaleur apportée par le combustible du fuel gaz :**

La chaleur apportée par le combustible du fuel gaz est égale aux flux chaleur de la combustion elle dépend du pouvoir calorifique inferieure du fuel gaz , la chaleur spécifique du fuel gaz , le débit du fuel gaz et la variation des température (T ent – T réf)

$Q_{fg} = \dot{m}_{fg} [PCI_{fg} + Cp_{fg} . (T\ ent - T\ réf)]$…….(III.7)

Avec :

$PCI_{fuel\ gaz} = 87.4\%\ PCI_{CH4} + 8.4\%\ PCI_{C2H6} + 2.6\%\ PCI_{C3H6} + 0.8\%\ PCI_{C4H10} + 0.1\%\ PCI_{C5H12} + 0.7\%\ PCI_{N2}$

$PCI_{fuel\ gaz}$ = 11033.13 kcal/kg

$PCI_{fuel\ gaz}$: pouvoir calorifique inferieure du fuel gaz est egale a 11033,13 kcal/kg

$Cp_{fuel\ gaz}$: chaleur spécifique du fuel gaz est egale a 0,78 kcal/kg °C

$\mathbf{m}_{fuel\ gaz}$: débit du fuel gaz est egale a 1119,26 kg/h

T_{ent}: température d'entrée du fuel gaz (=800°C)

$T_{référence}$: température de référence (=20°C)

Donc le flux de chaleur du fuel gaz donne par la formule (III.7) est egale a :

Q_{fg}= 13029898.87 *kcal /h*

✓ **Flux de chaleur du combustible :**

La chaleur apportée par le combustible du fuel gaz elle est égale aux flux chaleur de la combustion

$Q_{comb} = Q_{fg}$ .....(III.8)

Donc le flux de chaleur du combustible donne par la formule (III.8) est egale a :

Q_{comb}= 13029898.87 *kcal /h*

✓ **Chaleur totale de l'air :**

Pour calculer la chaleur d'entr n est obligé de passer d'abord par le calcul de la chaleur totale de l'air , elle dépond de la chaleur spécifique de de l'air , le débit d'air et la variation de la température ($T_{en\ a} - T_{réf}$)

$Q_a = Cp_a . \dot{m}_a . (T\ en_{\ a} - T_{réf})$ .....(III I.9)

Avec :

Cp_a : chaleur spécifique de l'air (0.247 kcal/kg. ℃)

m : débit massique de l'air 88855 *kg/h*

$T_{en\ a}$: température d'entrée de l'air (=30 °C)

$T_{réf}$: température de référence (=20°C)

Donc le flux de chaleur totale de l'air donne par la formule (III.9) est egale a :

Q_a= 219471.85 *kcal/h*

✓ **Chaleur de vapeur d'atomisation :**

La chaleur de vapeur d'atomisation est exprimée par la difference de l'enthalpie H_{vap} et H_{ref} multiplier par le débit de la vapeur d'atomisation

$Q_{vap} = m \cdot (H_{vap} - H_{réf})$ .....(III.10)

Avec :

m : Débit de la vapeur d'atomisation est egale a 3260 *kg/h*

H_{vap} = 728.894 kcal/kg
$H_{réf}$ = 640.071 kcal/kg

Donc le flux de chaleur de vapeur d'atomisation donne par la formule (III.10) est egale a :

Q_{vap} = 289562.98 *kcal /h*

✓ La quantité de chaleur entré

La quantité de chaleur entrer est un paramètre import nt dans le bilan thermique du rendement il se traduit par l'addition de la quantité de chaleur de (la combustion , la vapeur d'atomisation et l'air de la combustion)

$$Q_{ent} = Q_{comb} + Q_{vap} + Q_a \quad \text{.....(III.11)}$$

en remplacant les quantite de chaleur Qc ,Qv et Qa pour obtenir La quantité de chaleur entrants elle est egale a :

Q_{ent} = 13538933.7 kcal/h

✓ **Quantité de chaleur absorbée :**

La soustraction de la quantité de chaleur de (l'entr ,fumées et des perte par paroi) est le deuxième paramètre principale de la formule du rendement , c'est la quantité de chaleur absorb e par le système donc en peut l'appeler l'énergie utile

$$Q_{abs} = Q_{ent} - Q_f - Q_p \quad \text{.....(III.12)}$$

Donc le flux de chaleur absorbée est donné par la formule (III.12) elle est egale a :

Q_{abs} = 10476740.583 *kcal/h*

✓ **Quantité de chaleur perdue aux parois :**

Quantité de chaleur perdue aux parois est un inconvénient qu éliminer mais en peut le dégrader pour obtenir un meilleur rendement comme dans notre cas il présente 2% de la quantité de chaleur d'entr

$$Q_p = 2\% Q_{ent} \quad \text{.....(III.13)}$$

Q_P = 270778.674 *kcal/h*

✓ **Quantité de chaleur perdue aux fumées :**

Les pertes les plus importantes sont les pertes à la cheminée par les fumées qui sortent du four à une température assez élevée.

Avec : $Q_f = V_f . T_f . C_f$.....(III.14)

V_f = 12.31 m^3 / m^3 de GN

T_f = 703 °C

T T

= 0.28 kcal / Nm^3 °C

C_f : chaleur spécifique des fumées

Q_f = 12.31 * 703 * 0.28 = 2473 kcal/ Nm^3 GN

Les pertes horaires de fumées sont obtenues par le produit du débit horaire total du gaz naturel en Nm^3 /h aux pertes volumiques de fumées en kcal/Nm^3 GN :

D_{TOT} = (38 * 24) + (10* 24) = 1152 Nm^3 GN/h (24 bruleurs)

D_{TOT} : Débit horaire totale de gaz naturel

$Q_{ft} = D_{TOT} * Q_f$

Q_{ft} = 2791411.661 *kcal/h*

- **Résultat du calcul du bilan thermique :**

Les caractéristiques des matières entrantes et sortantes sont données dans le tableausuivant :

Quantité de chaleur	Notation	Valeur (kcal/h)
Fuel gaz	Q_{fg}	**13209898.87**
Combustible	Q_{comb}	**13209898.87**
L'air carburant	Q_a	**219471.85**
Vapeur d'atomisation	Q_{vap}	**289562.98**
Entrante	Q_{ent}	**13538933.7**
Absorbée	Q_{abs}	**10476740.583**
Perdue par parois	Q_p	**270778.674**
Perdue par fumées		**2791411.661**

Tableau III.3 : Quantités de chaleurs entrantes et sortantes

Le rendement d'un four « » est définie comme étant le rapport du de chaleur absorbé (Q absorbée) par le fluide procède au de chaleur fourni (Q entré) au four par la combustion , après avoir calculer touts les paramètre qui forment la formule du rendement en passe a l'application numérique et remarque après le résultat que notre rendement est inférieur aux rendement qui est donner par le constructeur et pour cette raison

$$\eta = \frac{Q_{ent} - Q_{ft} - Q_p}{Q_{ent}} x100$$

η = 77.38 %

III.19 Programmation sur MATLAB:

Un code de calcul sous le langage MATLAB a été élaboré à cet effet pour prendre en charge les différentes étapes de calcule. Ainsi, on a procédé par ce langage pour qu'on puisse varier la température de fumées et de l'air de combustion, en variant aussi l'excès d'air de 8 % jusqu'à % avec un pas de 10%.

a. organigramme de variation du rendement en fonction de la température d'air de combustion :

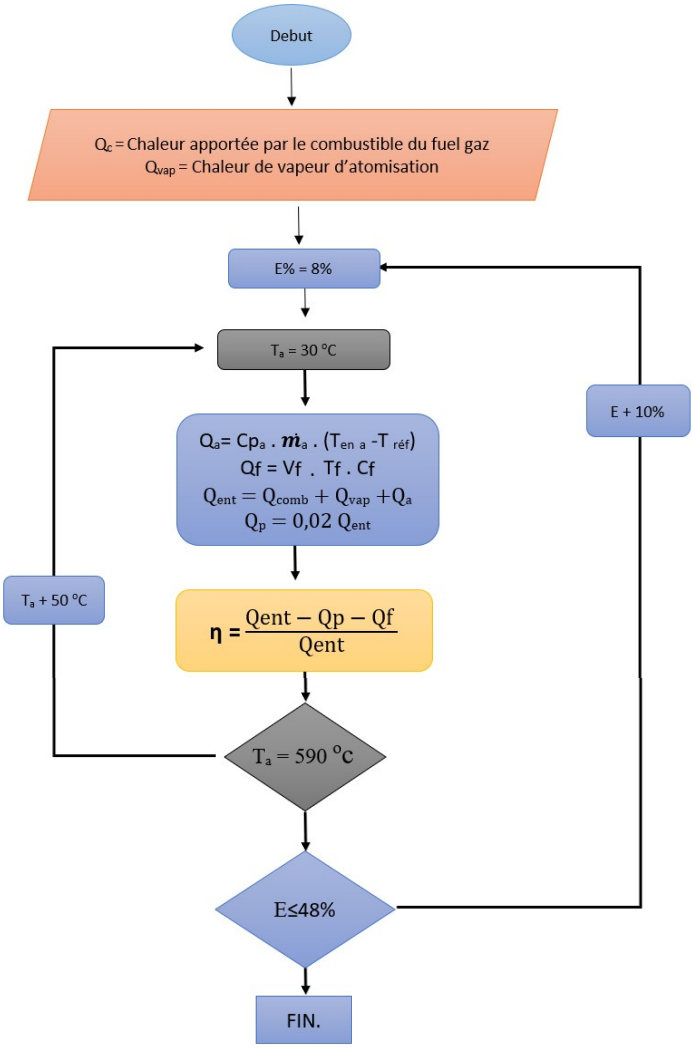


Figure III.3 : Organigramme qui résume le calcul du rendement en fonction de latempérature d'air de combustion

a. Organigramme de variation de température de fumées :

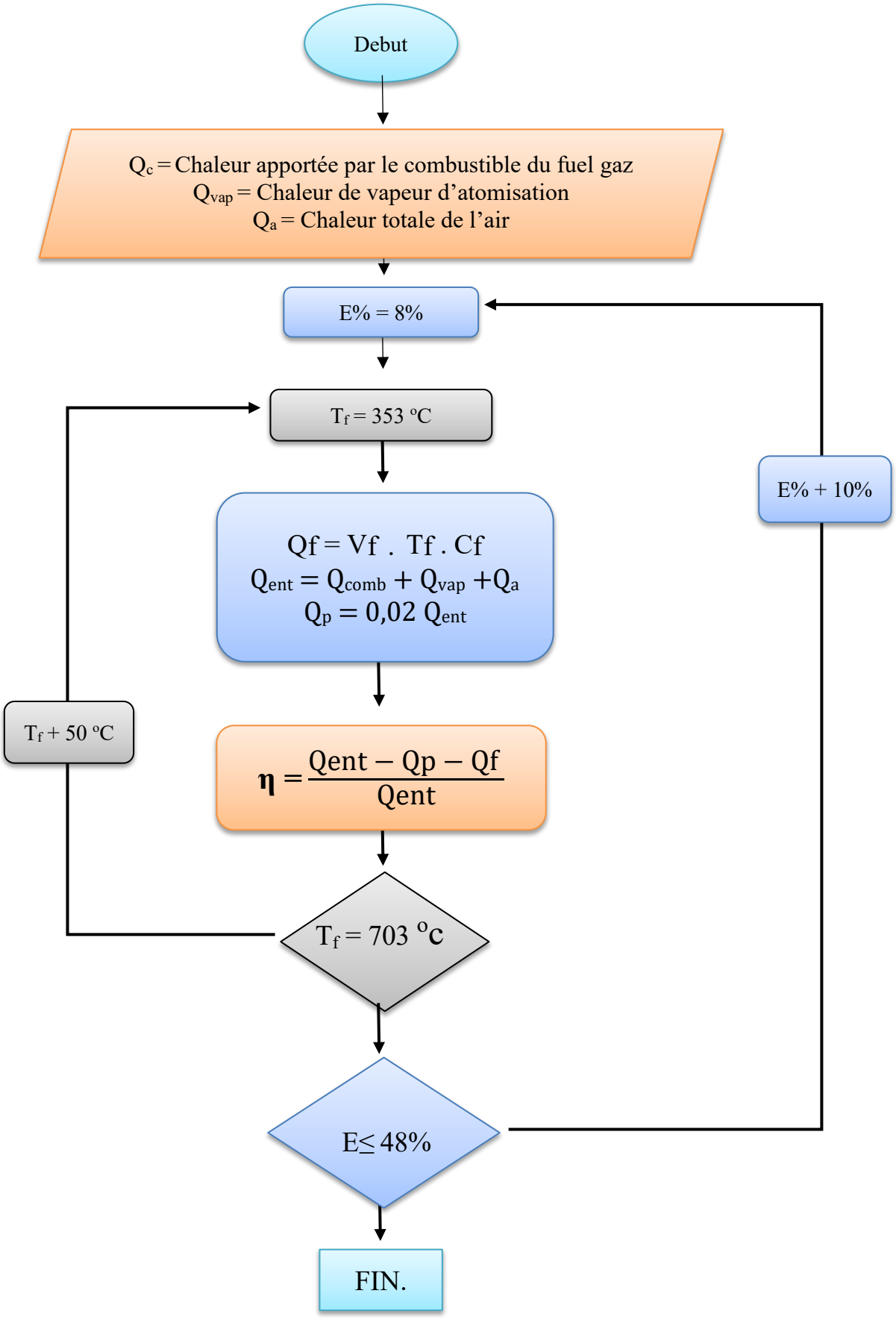


Figure III.4 : Organigramme qui résume le calcul du rendement en fonction de la température des fumées

III.20 Résultats du programme :

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux ci-dessous :

T_f (°C)	Rendement %				
353	88,2011	88,01843	87,83576	87,6531	87,4339
403	86,81315	86,60461	86,39607	86,18753	85,93728
453	85,42521	85,19078	84,95668	84,72196	84,44067
503	84,03726	83,77697	83,51668	83,2564	82,94405
553	82,64931	82,36315	82,07699	81,79083	81,44744
603	81,26137	80,94933	80,6373	80,32526	79,95082
653	79,87343	79,53551	79,1976	78,8597	78,45421
703	78,48547	78,12169	77,75791	77,39413	76,95759
Excès d'air %	8,00%	18,00%	28,00%	38,00%	48,00%

Tableau III.5 : Variation du rendement en fonction de la température de fumées pour differentes valeurs de l'exces d'air

T_a (°C)	Q_a (kcal/h)	Rendement %				
30	219471,85	76,9575902	77,3941286	77,7597106	78,1216925	78,4854745
100	1536302,95	78,8228122	79,2206553	79,5521913	79,8837273	80,2152632
170	3072605,9	80,6201431	80,9806995	81,2811631	81,5816267	81,8820904
240	4608908,85	82,1094433	82,4191031	82,7138197	82,9885363	83,2632528
310	6145211,8	83,3636492	83,6672898	83,9203236	84,1733574	84,4263912
380	7681514,75	84,4343551	84,7157832	84,9503065	85,1848299	85,4193533
450	9217817,7	85,3590869	85,6213308	85,8398674	86,058404	86,2729406
520	10754120,7	86,1657916	86,4112999	86,6158902	86,8204804	87,0250707
590	12290423,6	86,87571	87,1064962	87,2988078	87,4911249	87,6834421
Excès d'air%		48,00%	38,00%	28,00%	18,00%	8,00%

Tableau III.6 : Variation du rendement en fonction de la température de l'air de combustion pour differentes valeurs de l'exces d'air

Tf (°C)	Qf (kcal/h)				
350	1430537,73	1400860,3	1376129,11	1351397,92	1326666,73
403	1633163,47	1599282,44	1571048,25	1542814,05	1514579,86
453	1835789,21	1797704,58	1765967,38	1734230,19	1702492,99
503	2038414,95	1996126,72	1960886,52	1925646,32	1890406,13
553	2241040,69	2194548,86	2155805,66	2117062,46	2078319,26
603	2443666,43	2392970,99	2350724,8	2308478,6	2266232,4
653	2646292,17	2591393,13	2545643,93	2499894,73	2454145,53
703	2848917,92	2789815,27	2740563,07	2691310,87	2642058,67
Excèsd'air %	48%	38%	28%	18%	8%

Tableau III.7 : Variation de la chaleur perdue par fumées en fonction de la de fumées pour

T_a (°C)	Q_a (kcal/h)
30	219471,85
100	1536302,95
170	3072605,9
240	4608908,85
310	6145211,8
380	7681514,75
450	9217817,7
520	10754120,7
590	12290423,6

Tableau III.8 : Variation de la chaleur d'air de combustion en fonction de latempérature d'air de combustion

III.21 Résultats du programme saus forme des courbes

Les résultats obtenus sont dans les courbes ci-dessous :

III.21.1 Variation du rendement en fonction de température des fumées :

n vari la température du fumées de 350 °C jusqu'à 703 °C et on calcul le rendement pour différent s valeurs de l'excès d'air

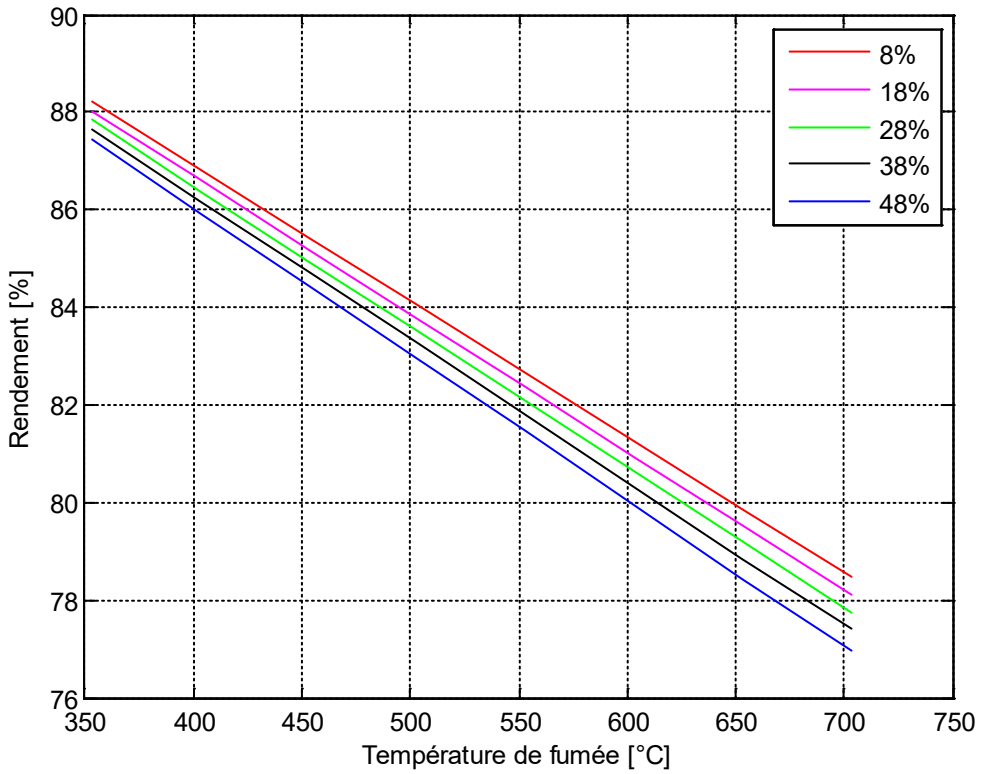


Figure III.5 : Variation du rendement en fonction de la température des Fumées

A partir de figure III.5, on remarque qu'un abaissement de 50 ℃ de températurea ux fumées correspond à un gain de rendement de l'ordre de 1.5 %.

Cette augmentation est plus importante si l'excès d'air est minimum.

Alors l'abaissement de la température des fumées c'est le moyen le plus efficaced'amélioration du rendement du four

III.21.2 Variation de la chaleur perdue par fumées en fonction de la température des fumées

On fait variée la température des fumées de 350 a 703 ºC et en calcul la chaleur de fumées pour chaque valeur de l'excès d'air

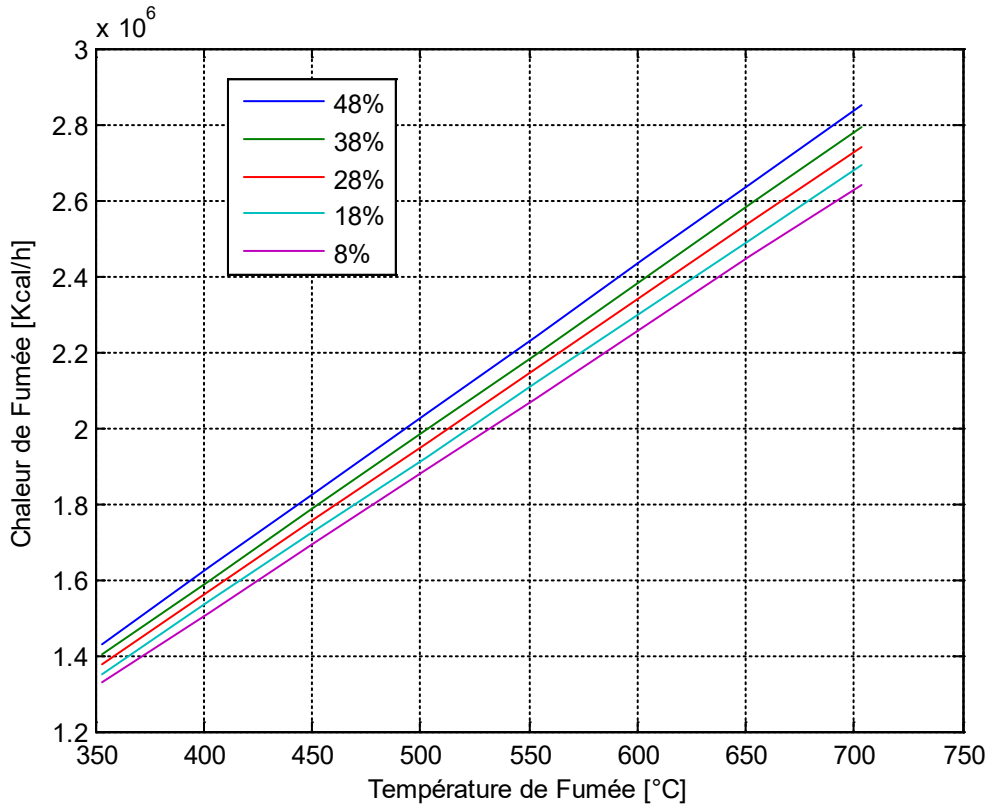


Figure III.6 : Variation de la chaleur perdue par fumées en fonction de la température des fumées

A partir de Figure III.6, on remarque que la diminution de la température de rejetdes fumées fait diminuer la chaleur perdue par fumées Cette chaleur a une relationdirecte avec la température de rejet des fumées, qui est d'autant plus élevée que larécupération d'énergie est moins bonne et donc le rendement du four est faible.

III.21.3 L'influence de la température de l'air de combustion sur le rendement :

On fait variée la température de l'air de combustion de 30 à 590 °C et en calcul le rendement pour chaque valeur de l'excès d'air

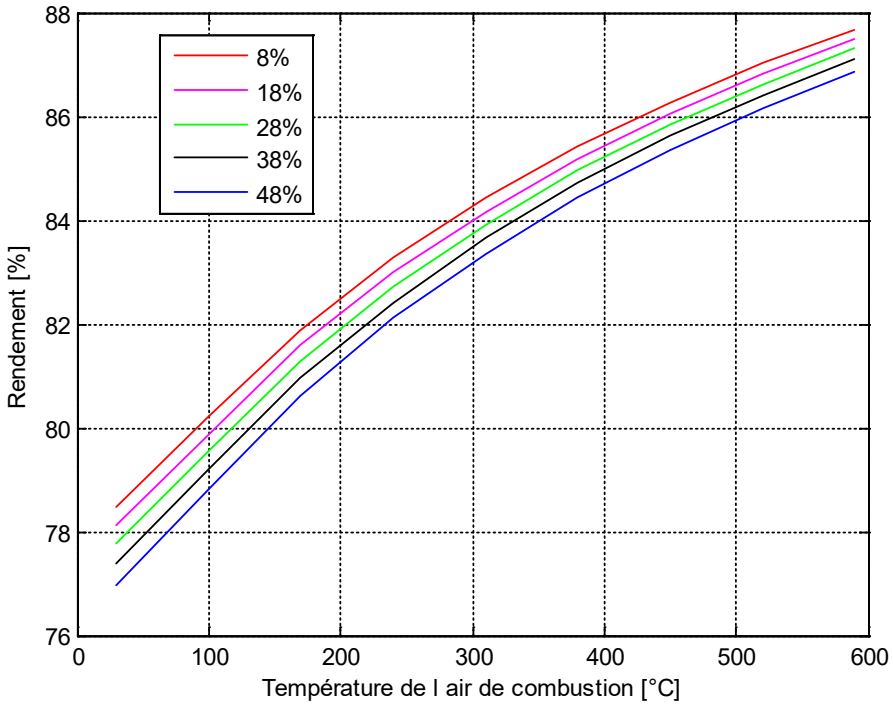


Figure III.7 : Variation du rendement en fonction de la température de l'air de combustion

A partir de figure III.7, on constate que l'augmentation de la température de l'air combustion augmente le rendement. Car si on augmente la température de l'air decombustion on obtient un bon mélange air/gaz cela donne une bonne combustion d'une part et l'économie du gaz naturel d'une autre part.

Ceci a des avantages économiques**.**

III.21.4 L'influence de la chaleur de combustion sur le rendement :

On vari la chaleur de l'air de combustion de . .
rendement pour chaque valeur de l'excès d'air

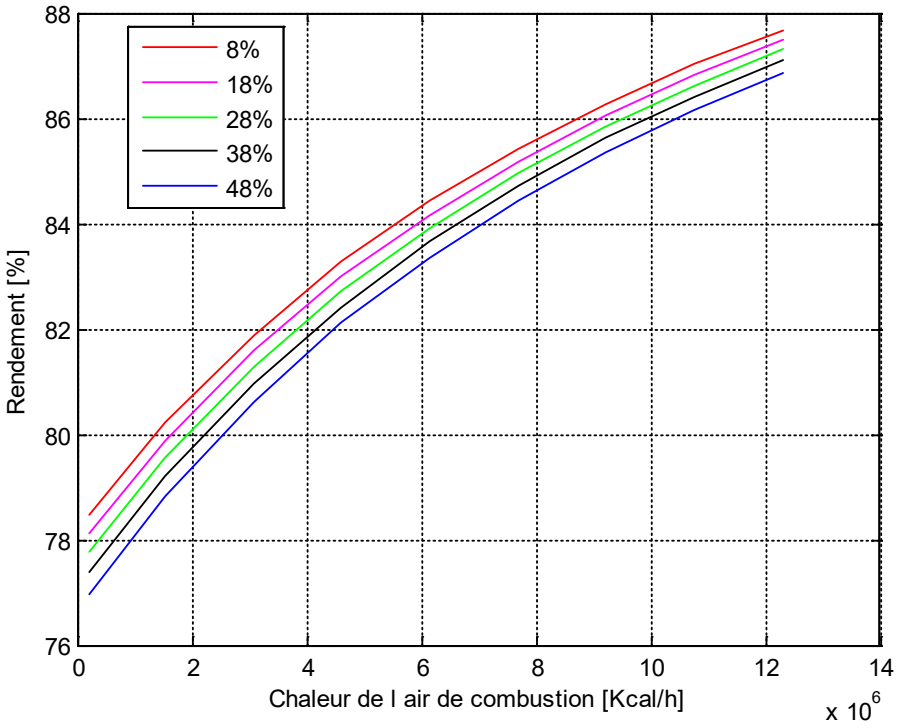


Figure III.8 : Variation du rendement en fonction de la chaleur de combustion

A partir de igure III.8, on constate que plus qu'on augmente la chaleur de combustion plus le rendement.
Pour augmenter cette dernière il est nécessaire d'augmenter la température de l'air decombustion.
Cette augmentation est plus importante si l'excès d'air est minimum.

III.21.5 L'influence de la température d'air de combustion sur la chaleur d'air :

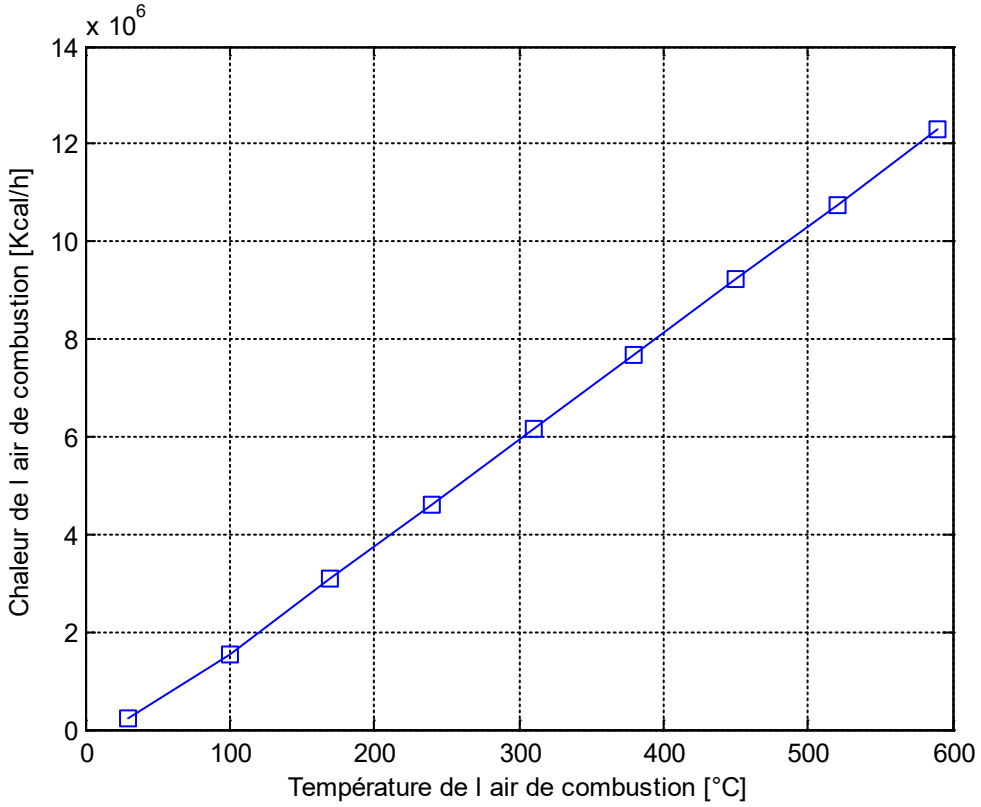


Figure III.9 : Variation de la chaleur d'air en fonction de la température d'air

A partir de Figure III.9, on remarque que l'augmentation de la température d'air decombustion augmente la chaleur d'air.

Donc le contrôle du flux de l'air de combustion est basé sur le contrôle de latempérature d'air entrante.

III.22 Les paramètres dont dépend le rendement :

Le pourcentage de pertes par les fumées dépend de deux paramètres :

- **Excès d'air de combustion :**

Qui accroit le débit de fumées et diminue le rendement du four. En effet, le débit d'air excédentaire consomme de l'énergie libérée aux bruleurs pour s'échauffer de la température ambiante à celle de rejet des fumées. La combustion en excès d'air se traduit par la présence d'oxygène dans les fumées en teneur d'autant plus élevée que l'excès d'airest grand.

- **La température de rejet des fumées :**

Qui est d'autant plus élevée que la récupération d'énergie est moins bonne et donc le rendement du four est faible.

Le débit des fumées s'accroît avec l'excès d'air aussi faible que possible, tout en veillant àobtenir une combustion complète, sans imbrûlés ; on peut jouer sur ce facteur par un réglagecorrect de la combustion, encore que, même avec des brûleurs bien conçus, on ne puisse descendre en dessous d'une certaine limite car on risque d'avoir une combustion incomplète dont les inconvénients sont :

D'abord la réduction du dégagement de chaleur par unité de poids de combustible brûlé, donc une réduction du rendement contraire à l'effet recherché ; la formation de CO susceptible de se combiner à l'oxygène encore présent dans les fumées en dehors de la chambre de combustion (phénomène de postcombustion qui peut endommager le four). La température des fumées dépend d'un très grand nombre de facteurs ; en fait, pour un excès d'air donné, la température à laquelle les fumées sortent de la zone de radiation est déterminée par charge thermique du four, la surface et la température des tubes.

L'aménagement d'une zone dite de convection, constituée d'un faisceau tubulaire placé sur le trajet des fumées vers la cheminée, permet de récupérer une partie de a chaleur sensible de celles-ci

III.23 Possibilités et limites à l'amélioration du rendement :

L'amélioration du rendement repose sur la réduction des pertes thermiques de deux natures :

- ✓ pertes aux parois
- ✓ pertes aux fumées.

a. 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 économique de cette solution est relativement limité.

b. Réduction des pertes aux fumées :

La réduction des pertes aux fumées peut être réalisé par :

- ✓ Réduction de la température de rejet de fumées
- ✓ Réduction de l'excès d'air

- **Réduction de l'excès d'air**

Cette réduction permet l'économie de combustible utiliser pour préchauffer l'air en excès de la température ambiante à la température des fumées. Elle rencontre cependant comme limite d'apparition d'imbrulé dans les fumées auxquels correspondent **:**

- ✓ Une perte de chaleur de combustion
- ✓ Un encrassement de la zone de convection réduisant son efficacité.
- ✓ Un risque de post- combustion des imbrulés présentant un danger pour le personnelet le matériel

Les équipements de contrôles permettant d'apprécier l'apparition d'imbrulés aux fumées sont :

- L'opacimètre, dans le cas de combustible liquide.
- L'analyseur de CO dans le cas de combustible gazeux.La réduction de l'excès d'air peut toutefois être obtenue :

- ✓ En utilisant des bruleurs réalisant un bon mélange de l'air et du combustible, enparticulier par la turbulence imposée à l'air.
- ✓ En utilisant de l'air préchauffé qui favorise la combustion.
- ✓ En fin si la température de rejet des fumées est basse, la recherche de lacombustion à bas excès d'air présente un intérêt

III.24 Conclusion :

Calculez la puissance du four dans ce chapitre pour une amélioration
maximale Nous avons besoin de connaître les paramètres suivants :

• Les pertes pariétales, qui représentent 1 à 2 % de la chaleur dégagée par le brûleur.
Les pertes murales sont principalement dues à une mauvaise isolation.

• Les pertes de fumées qui représentent 5 à 20 % de la chaleur dégagée par le brûleur.
La perte de fumée est due à :

- ✓ **Excès d'air** : A partir des résultats obtenus on constate que l'effet de l'excès d'air n'est pas important sur performance du four étudie
- ✓ **Température de fumées** : Réduire la température des fumées est le moyen le plus efficace d'améliorer l'efficacité du four.
- ✓ **Température de l'air de combustion** : L'efficacité dépend également de la température de l'air d'admission qui joue un rôle important dans la combustion

Chapitre IV : Technologies d’amélioration du rendement du four

Chapitre IV : Technologies d'améliorations du rendement du four

Ⅳ.1 Introduction :

Il existe plusieurs voies pour améliorer le rendement énergétique des fours. Dans notre cas, étant donné que les pertes des fumées à 703°C sont la principale cause, la solution la plus évidente est d'exploiter cette chaleur. Ainsi, on optera dans notre étude à l'option du préchauffage de l'air de combustion par cette fumée à travers la disposition d'un préchauffeur d'air.

Ⅳ.2 Discussion des résultats obtenus dans le chapitre III:

- D'âpre le tableau (III.5) en remarque une diminution de la température de rejet de fumées de 50°C fait augmenter notre rendement de 1.5%.
- Plus la température de fumées est élevée plus la récupération d'énergie est moins et plus le rendement est faible
- Augmenter la température entrante de l'air fait augmenter le rendement mais aussi ça nous donne un bon mélange air/gaz ce qui donne une bonne combustion et permet l'économie de combustible
- L'isolation thermique du four a une importance remarquable sur le rendement.
- L'abaissement de la température des fumées c'est le moyen le plus efficace d'amélioration du rendement du four.
- L'excès d'air de combustion fait accroitre le débit de fumées et fait diminuer le rendement du four. En effet, le débit d'air excédentaire consomme de l'énergie libérée aux bruleurs pour s'échauffer de la température ambiante à celle de rejet des fumées. La combustion en excès d'air se traduit par la présence d'oxygène dans les fumées en teneur d'autant plus élevée que l'excès d'air est grand.
- La teneur en imbrulés est généralement faible n'apparait que pour des excès d'air trop faible.
- rendement égale à **92,90%** T_a= 600°C , T_f=353°C et E= 8%

Ⅳ.3 Système de préchauffage de l'air :

Le préchauffeur de l'air joue un rôle clé pour la récupération de chaleur, en permettant de diminuer la température des fumées.

Le système que nous allons élaborer consiste à préchauffer l'air de combustion, ce qui permet 20 :

- La réduction de la consommation du combustible ;
- Un contrôle plus avancé du flux de l'air de combustion ;
- Moins d'encrassement au niveau des bruleurs ;
- Contrôle de la flamme de combustion ;
- Une combustion complète ;

Cette solution présente l'avantage de disposer d'un fluide vraiment froid et utile au procédé de combustion mis en œuvre dans le four lui-même.

Lorsque la température d'entrée du fluide à réchauffer ne permet pas de refroidir les fumées à un niveau tel que le rendement du four n'est pas à son optimum économique, on peut effectuer un recyclage thermique avec changement de support. Il s'agit d'enleverla chaleur des fumées sortant du four pour la réintroduire à l'entrée de la chambre de decombustion.

Un recyclage pur et simple de fumées n'apporte rien, car la température du fluide froidlimite la température de refroidissement des fumées.

Il faut donc nécessairement utiliser un fluide à température plus basse. L'air de combustion remplit ces conditions. [13]

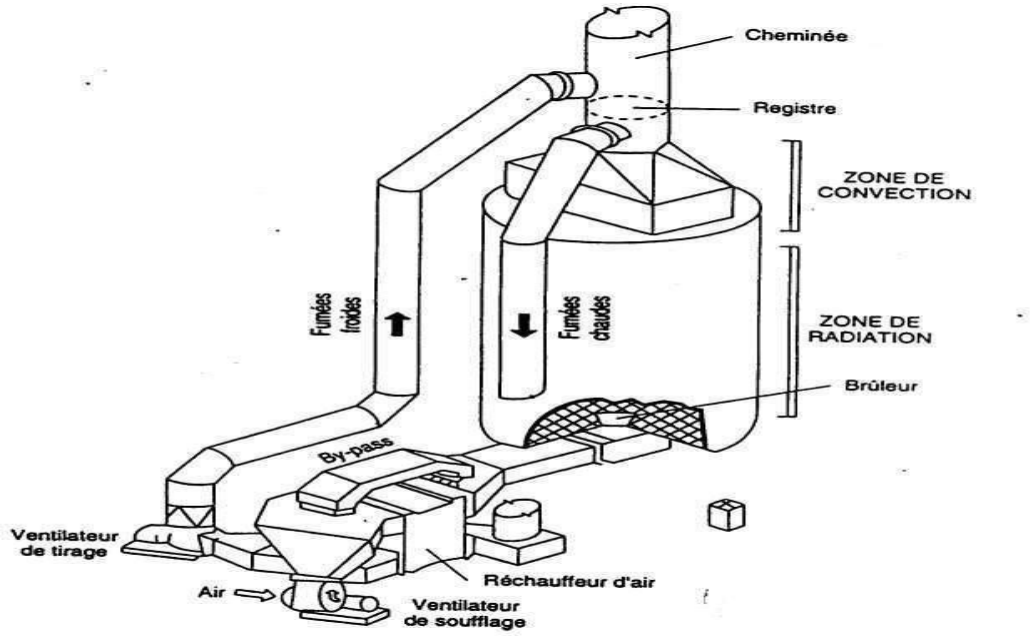


Figure IV.1 : Réchauffeur d'air de combustion Four cylindrique [13]

Ⅳ.4 Contrôle de la température froide des fumées :

Pour ne pas limiter la durée de vie normale du récupérateur de chaleur, il est très important d'avoir la possibilité de maintenir la température finale des fumées refroidis au-dessus de la température de rosée de l'acide sulfurique durant toutes les conditions d'exploitation, même si les conditions de conception n'implique pas la nécessité d'un système de contrôle

Dans le cas de combustible contient le soufre, l'abaissement de la température de rejet desfumées rencontre comme limite le point de rosée acide à partir auquel apparaissent les problèmes de corrosion sulfurique des surfaces métalliques d'échange.

Cette limite peut être repoussée si la corrosion est consentie ou si l'on a recours à des surfaces résistantes à la corrosion (verre, tôle émaillée).

On cite ici quelque cas d'exploitation qui requiert un contrôle de température :

- Une température ambiante très basse.
- Un changement dans les compositions du fuel.

Il est à noter que chaque combinaison des cas cités auparavant aggrave encore plus la situation.

Ⅳ.5 Les types des systèmes de préchauffage de l'air :

En se basant sur la circulation des fluides à travers le système, on cite les trois configurations suivantes :

- Système à tirage équilibré.
- Système à induction forcée.
- Système à tirage forcé.

Le système le plus répondu est celui du tirage équilibré, il comprend deux ventilateurs : l'unpour l'induction forcé de l'air et l'autre pour le tirage forcé des fumées hors cheminée. Le système est dit équilibré en termes de pression, car l'air de combustion assuré par le ventilateur d'induction forcé est équilibré par l'acheminement des fumées à travers l'extracteur de tirage forcé.

Généralement, le ventilateur de l'induction forcé est contrôlé par l'analyseur d'O_2 au niveaude la cheminée. Si, par exemple, le pourcentage d'O_2 diminue dans les fumées, une commande est lancée pour augmenter le débit d'entrée d'air, de même le ventilateur de l'extraction forcé est commandé par un contrôleur de pression au niveau du bas de la cheminée.

Pour le simple système à induction forcé, on a uniquement un seul ventilateur qui assure l'entrainement de l'air requis pour la combustion. Les fumées sont tirées grâce à la dépression naturelle causée par la cheminée. Vu que la cheminée n'a pas la capacité de produire une grande dépression, les pertes de charge cotée fumée de l'échangeur doivent rester très faibles, donc on aura un échangeur plus grand et plus coûteux.

La troisième configuration basée sur le type de circulation présent une extraction forcée des fumées pour maintenir la dépression appropriée pour une exploitation optimale. L'air est induit aux brûleurs grâce à la pression négative qui règne dans le four. Dans ce cas l'échangeur doit être conçu prudemment pour minimiser les pertes de charge.

Ⅳ.6 Choix de type de préchauffeur de l'air :

L'échange de chaleur par contact direct entre les fumées et l'air n'est pas évidement possible à cause du mélange de fumées et de l'air qui ne manquerait pas de se produire.

Dans un récupérateur, l'air et les fumées sont séparés par une paroi chauffante. Dans un régénérateur on évite le mélange, puisque les fumées et l'air sont amenés en contact chacunà leur tour avec la surface chauffante, la paroi étant chauffée par la chaleur qu'elle prend aux fumées, puis refroidie par la chaleur qu'elle cède à l'air.

La configuration de récupérations peut correspondre à chacun des trois modes d'échange de chaleur – contre-courant, co-courant et courant croisé –ou à des combinaisons de ceux- ci. Les régénérateurs sont, sans exception, des échangeurs de chaleur à contre-courant.

Dans les préchauffeurs d'air rotatifs ou régénératifs, les éléments métalliques tournants sont exposés successivement aux fumées et à l'air de combustion.

Ces éléments portés en température par les fumées réchauffent ensuite l'air de combustion. Ce type de régénérateur présente les limitations suivantes :

- Fuite d'air vers les fumées au niveau des joints d'étanchéité.
- Risque d'incendie par inflammation des dépôts.
- Conduite plus délicate.
- Intéressants pour les fours de puissances thermiques importantes supérieurs à 50000T/h [22].

Le préchauffeur d'air a le même rôle d'un échangeur de chaleur

L'échangeur de chaleur peut être implanté dans l'installation de préchauffage selon trois alternatives

- Système direct de préchauffage de l'air.
- Système indirect de préchauffage de l'air.
- Système de préchauffage de l'air avec une source externe

Les systèmes de préchauffage direct utilisent un régénérateur, récupérateur, ou échangeur à tubes pour transférer directement la chaleur des fumées de cheminée extraverti à l'air de la combustion. Bien que la plupart des systèmes de préchauffage direct utilisent la conception équilibrée, on ne peut pas éliminer les deux autres options utilisant simplement soit l'induction forcée, soit le tirage forcé, car parfois elles peuvent être justifié économiquement bien que c'est au détriment de la qualité de marche du système.

Une autre configuration qui n'est pas très commode est celle qui utilise deux échangeurs gaz/liquide. Le premier absorbe la chaleur des fumées via un fluide intermédiaire, ensuite cette chaleur sera évacuée dans un autre échangeur. Ce système exige qu'une boucle de circulation du fluide soit active pour réaliser l'échange.

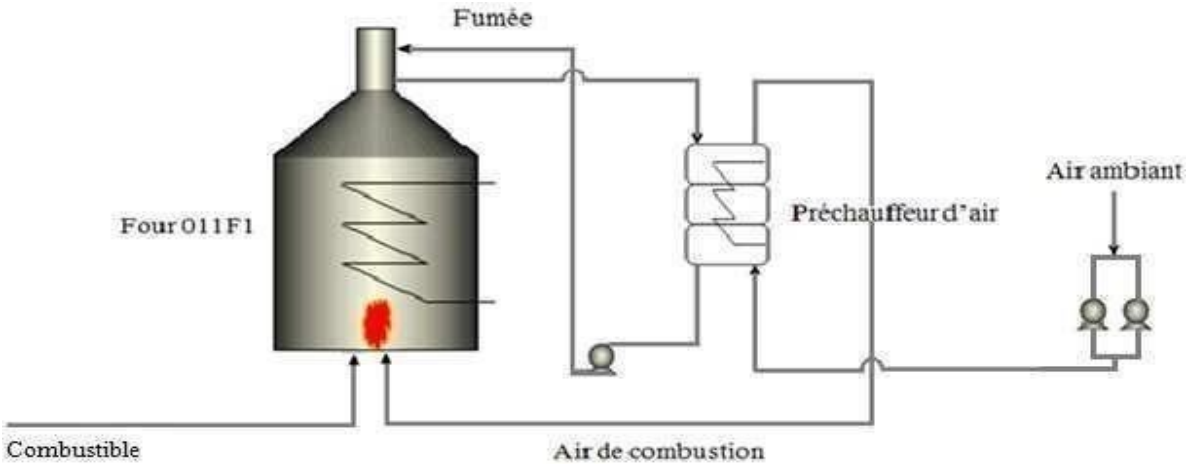


Figure IV.2 : Installation de préchauffeur d'air

Ⅳ.7 Ajustement de l'excès d'air :

L'une des considérations importantes pour maximiser le rendement d'un four est le contrôle du flux d'air de combustion et le maintien de cet excès à sa valeur nominale assurant ainsi une combustion complète, stable et des flammes bien définissent.

Typiquement, un four muni d'un système de préchauffage à tirage équilibré opère à un excès d'air réduit de 10 à 15% par rapport à un système à induction naturelles. Ceci est dû au contrôle avancé et à l'instrumentation.

Ⅳ.8 Technologies d'améliorations du four :

- **Ramoneurs**

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

Plusieurs types sont disponibles :

- **Appareils à soufflages d'air ou de vapeur :**

Ce sont des tubes rotatifs, fixes ou rétractables, comportant des buses de soufflage. Ils sont utilisés de façon intermittente (en général 3 fois par 24 heures) pour souffler les dépôts pulvérulents qui ont pu se déposer sur les surfaces d'échanges.

- **Ramoneurs acoustiques ou subsoniques :**

Ce sont des appareils qui émettent des vibrations acoustiques ou infrasonores dans l'enceinte de la zone de convection, afin de maintenir en suspension les poussières et ainsi éviter leurs dépôts sur les surfaces d'échanges

- **Ventilateur à tirage forcé :** pour rôle d'alimenter l'air de combustion

- **Ventilateur à tirage induit** : pour l'extraction des fumées

- **Préchauffage vapeur/air**

Pour éviter la corrosion acide sur l'extrémité froide du préchauffeur de fumées/air pendant la chauffe au mazout, le préchauffeur de fumées/air est équipé d'un préchauffeur de vapeur/air, avec chemise et tubes.

La vapeur est forcée dans les tubes tandis que l'air à préchauffer passe à travers les tubes.

- **Décokage :**

Les tubes peuvent s'oxyder extérieurement et s'encrasser intérieurement. L'oxydation externe se manifeste sous forme de pellicules isolantes et tend à réduire le flux de chaleur à travers le tube, abaissant ainsi le rendement d'absorption. L'encrassement interne peut se présenter sous forme de dépôt de coke ou de sels déposés uniformément ou localement. Il constitue une résistance thermique supplémentaire et limite l'échange de chaleur vers le fluide, tout en augmentant la température de peau de tube. Les tronçons amovibles de tuyauterie sont fournis pour l'entrée et la sortie du four afin de permettre l'opération de décokage.
Ce procédé consiste à nettoyer les tubes d'un four globalement par passes par l'action de l'air et de la vapeur. Le décokage est habituellement divisé en deux phases : désagrégation, brulage.
Pendant la désagrégation on admet seulement de la vapeur par l'entrée normale du faisceau à un taux élevé tandis que l'on chauffe. Le coke est détaché par l'action refroidissante de la vapeur sur les tubes chauds obligeant le coke à se contracter et à se briser. L'entrainement par la vapeur à grande vitesse et l'action chimique (réaction de production de gaz : $C + H_2O = CO + H_2$) lors d'une opération bien conduite, permettent d'enlever 90 à 95 % du coke.
Pendant le brulage on admet l'air et la vapeur par l'entrée du faisceau et le coke restant est ainsi éliminé par oxydation directe.

Ⅳ.9 Réduction des polluants :

- ✓ Pour réduire les émissions sulfurées on devra limiter le soufre du combustible. Une installation de désulfuration de fumées, onéreuse, n'est généralement pas prévue pour les fours
- ✓ Pour réduire les émissions d'oxyde d'azote, on dispose des méthodes suivantes :
- ✓ Réduire la teneur en oxygène (réduire l'excès d'air). Toutefois, pour des excès d'air inferieurs à 10 – 15 %, c'est la température qui est prépondérante dans le processus de formation des NO_X et réduire l'excès d'air en deçà de 10 % nécessite un contrôle sévère de la combustion.
- ✓ Réduire la température dans la zone de combustion
- ✓ séparation des jets de combustibles : le fonctionnement du débit de combustible permet d'obtenir des zones de combustion séparées refroidies par rayonnement sur les surfaces d'échange. C'est une solution en développement pour les combustiblesliquides, pour lesquels l'étagement du combustible n'est pas pratiquement applicable.
- ✓ Les teneurs en NO_X s'expriment le plus souvent pour les combustibles liquides ou gazeux en vpm (volume par million) ou en mg/m^3 N, sur des fumées sèches à 3 % d'oxygène, tous les oxydes d'azote étant considérés comme du NO_2.
- ✓ traitement des fumées par réduction catalytique des NO_X (par exemple: injection de NH_3– température de 300 à - catalyseur).

IV.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié les différents points qui influent sur les performances du four, et nous avons dit qu'un préchauffeur d'air est le meilleur dispositif pour abaisser la température des fumées et augmenter la température de l'air.

.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le but de cette etude est de faciliter les travaux liés à l'amélioration des performances des fours et de comprendre l'impact de la combustion sur l'efficacité des fours.

L'évaluation des performances d'un four nécessite la compréhension et la maîtrise des flux entrants et sortants (matière et chaleur).

pour déterminer rendement du four, nous avons effectué un bilan thermique.

Les performances actuelles de nos fours sont relativement faibles par rapport aux performances du constructeur en raison de plusieurs facteurs dont les plus importants peuvent être cités tels que:

- Pertes par parois qui sont dues d'une mauvaise isolation thermique
- Pertes par fumées qui dépendent :

- L'excès d'air : la combustion en excès d'air est traduite par la présence d'oxygène
- Température de rejet de fumées qu est élevée, on vise la diminuer jusqu'à $353C^{O}$

- Température d'air de combustion qu est faible, on vise à l'augmenter pour avoir une bonne combustion.

De ces raisons, on peut conclure que la réduction de la température des gaz de combustion [$T_f = 703C^{o}$] est le moyen le plus efficace pour améliorer l'efficacité du four. Cette amelioration de rendement prise 703 ^{o}C dans cette etude sera plus importante si l'excès d'air est minime. Par conséquent, l'augmentation de la température de l'air de combustion augmente l'efficacité.

Conclure notre travail et trouver des solutions pour faire face aux pertes et améliorer les performances en propose les recommandations suivant :

- D'installer un préchauffeur fumées/air, c'est la solution la plus évidente est d'exploiter cette chaleur. Ainsi, on optera dans notre étude à l'option du préchauffage de l'air de combustion par cette fumée à travers la disposition d'un préchauffeur d'air.
- Augmenter la surface de convection permettra d'absorber plus de chaleur ce qui réduira la température des fumées à la sortie.
- Réduire l'excès d'air.
- Réduire les pertes aux parois par l'amélioration de l'isolation thermique

Références

1. Documentation de la raffinerie d'Alger, «Manuel d'exploitation»,1964
2. raffinage, Trois étapes de. Planète d'énergie. [www.planete-energies.com]
3. Documentation de la raffinerie d'Alger, ***''Manuel d'exploitation''***. 1964.
4. Foster Wheeler, ***''Manuel d'exploitation''***, unité de distillation, Raffinerie d'Alger : s.n : 1963.
5. Documentation de la raffinerie d'Alger, ***''Manuel opératoire''***, GPL.
6. ***''Manuel opératoire carburant''***, unité de reforming catalytique.
7. ***''Manuel opératoire stockage''***, mélange et expédition.
8. ***''Production des Essences sans plomb''***, Post-Réhabilitation des raffineries en Algérie.
9. La raffinerie d'Alger, ***''Documentation de la raffinerie''*** .
10. Trambouze, Pierre, ''***Raffinage de pétrole Tome 4- Matériels et équipements***'', s.l: édition technip , 1999 .
11. Wauqier, Jean-Pierre,'' ***Raffinage du pétrole Tome 2 (Procédés de séparation)***'', s.l: édition TECHNIP , 1998.
12. Hajar, Mernissi Khaoula, EL Aychy, ''***L'amélioration du rendement du four 011F1 de Topping 2 par procédé du tirage forcé***'', Thèse de Doctorat: s.n. /13-MGI.
13. Raffinerie d'Alger , [interpr.]. ***Les fours dans l'industrie pétrolière***.
14. sergo, Razika, ***''Fours de raffinerie''***. [2014]
15. Association française des techniciens du pétrole, ***''Les fours de raffinerie''***, [www.editionthecnip.com].
16. Raffinerie d'Alger, ''***Documentation de la raffinerie***'', RB-10009-CAL-001 .
17. BELAKHOWSKY, Samuel,'' ***Introduction aux combustibles et à la combustion***'' . 1978 .
18. Roland BORGHI, Michel DESTRIAU, Gérard DESOETE, ''***La combustion et les flammes ''***

1995 . [www.editionthecnip.com]..

19. BENSALEH Mohamed Amine, BENAISSA Asma, ''***Etude paramétrique et optimisation multicritère d'un four industriel de l'unité CPF de traitement de gaz naturel de RhourdeNouss-Algérie''***, Université de Blida 1 : s.n., 2017/2018.
20. Nogues, J.Le, ***''Etudes des fours pétrolier et pétrochimique''***,s.l.:[www.editionthecnip.com]., 1974.
21. Technique de l'ingénieur, ***''Transfert thermique''***.
22. Americain Petroleum institute, ***''Fired heaters for general refinery service API560''***.
23. MAHDI Yasser, KRAMI Mohamed Hichem,***''Régulation de la combustion dans les deux chaudières à vapeur de la raffinerie d'Alger''***, s.l: Université Saad Dahlebn de Blida, 2011/2012.