



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie



N° d'ordre : M2...../GP/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Industries pétrochimiques

Spécialité : Génie Pétrochimique

Thème

***CALCUL DE VERIFICATION DU FOUR F-01 DE LA
RAFFINERIE D'ARZEW (RA1Z)***

Présenté par :

1. DOUAH KHADIDJA
2. HADJ MOHAMED SOFIA

Soutenu le 06/07 / 2022 devant le jury composé de :

Président : MOHAMED SEGHIR Zahira M.A.A à l'Université de Mostaganem
Examineur : FARES Zineb M.A.A à l'Université de Mostaganem
Rapporteur : MEZOUAGH Amina M.C.B à l'Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2021 / 2022

Dédicace

À la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur. à toi ma Maman.

À l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à mon père رحمه الله

*À mes frère et mes sœur et ma petite sœur **Ghanou** mes nièces, je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.*

À celui qui m'a soutenue tout au long de ce projet.

*À mon binôme, et mes chères amies **Hanane** et **Nadia**.*

D. Khadidja

Dédicace

Tout d'abord, je voudrais remercier Dieu pour le succès que j'ai réussi à remplir ce mémoire,

À la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, à toi ma Maman.

À l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père

*je remercie également mon frères **sofiane** et ma sœur **nesrine** pour leur soutien moral*

*A mes amis **Khadidja et chaimaa***

H.Sofia

Remerciements

Merci à Dieu le tout puissant de m'avoir donné le privilège et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la Science.

*J'adresse mes remerciements à mon Encadreur **MEZOUAGH Amina** pour sa participation et ses conseils prodiges à la réalisation de ce travail.*

Mes respect aux membres de jury, qui nous feront l'honneur d'accepter de juger ce modeste travail, d'apporter leurs réflexions et leurs critiques scientifiques.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à tous les enseignants du département Génie procédé de la faculté de technologie –Mostaganem

Sommaire

Remerciement	
dédicace	
Sommaire	
Introduction générale	01
Chapitre I : Présentation de la raffinerie d'Arzew	
I .1 Présentation de la raffinerie d'Arzew	02
I.2 Capacités de traitement :	02
I.3 Présentation des installations de production :	03
I.4 Département de sécurité industrielle	06
I.5 Laboratoire de contrôle :	06
Chapitre II : les fours industriels	
II .1 Définition	07
II.2 Rôle des fours dans l'industrie pétrolière	07
II.3 Description d'un four	08
II. 4 Principaux types des fours	09
II .5 Choix d'un four	13
II.6 Rendement d'un four	15
Chapitre III : Calcul thermique du four	
III.1 spécification du four F-01	17
III.2 Equipements	17
III.3Gaz de combustion	17
III.4Données de départ	17
III.5 La composition du gaz de combustion	18
III.6Calcul de la combustion	19
Conclusion générale	29
Références et bibliographiques	30

Liste des figures

Figure I.1: Plan de masse de la raffinerie d'Arzew	4
Figure II. 1 : Schéma d'un four classique	11
Figure II .2 : une vue écorchée d'un four cylindrique vertical	15
Figure II.3 : Vue d'un four cabine à tube horizontaux	16
Figure II.4 : vue d'un four cabine à brûleur sur la paroi	17

Liste des tableaux

Tableau I.1 : les capacités annuelles de production de la raffinerie d'Arzew	2
Tableau III.1 - composition du gaz combustible	18
1Tableau III.2 – Résultats calcul de la combustion	25

Introduction générale

Le pétrole a pris une place considérable dans la civilisation, non seulement parce qu'il est source d'énergie qui avec le gaz naturel fournit plus de 50% (33% par le pétrole et 24% par gaz naturel) des besoins énergétiques mondiaux.

L'objet du raffinage est de convertir les matières premières naturelles comme le pétrole brut et le gaz naturel en des produits utiles et commercialisables. Le pétrole brut et le gaz naturel sont des hydrocarbures naturels que l'on trouve dans beaucoup d'endroit du globe en quantités et composition variées. Dans les raffineries, ils sont transformés en différents produits sont :

- Des essences pour les voitures, les camions, les avions, les navires et les autres formes de transport.
- Des fuels de combustion pour la génération de chaleur et d'énergie pour l'industrie et l'habitat.
- Des matières brutes pour l'industrie pétrochimiques et chimique.
- Des produits spécialisés comme lubrifiants, les paraffine /cire et le bitume.
- De l'énergie en tant que sous-produit sous forme de chaleur (vapeur d'eau) et d'énergie (électricité).

Afin de fabriquer ces produits, ces matière bruts sont traités dans un certain nombre d'installation de raffinage différentes .la combinaison des ces unités de traitement pour convertir le pétrole brut et le gaz naturel en produits, y compris les unités est les infrastructures annexes, est appelée une raffinerie. La demande de marché pour ce type de produits, la qualité du brut disponible et certaines exigences des autorités influencent la taille, la configuration et la complexité d'une raffinerie. Comme ces facteurs varient d'un endroit à l'autre, il n'existe pas deux raffineries identiques.

Pour mener à bien notre étude, nous avons structure notre travail comme suit :

- Le premier chapitre, dans laquelle nous présentons une brève description du complexe
- Le deuxième chapitre, donne les fours industriels et généralités de fours.
- Le dernier chapitre, comporte un calcul du four F-01 et on termine par une conclusion générale.

Chapitre I : Présentation de la raffinerie d'Arzew

Chapitre I : Présentation de la raffinerie d'Arzew

I.1 Présentation de la raffinerie d'Arzew[3]

La raffinerie d'Arzew est considérée comme un important complexe industriel, réalisée dans le cadre de premier plan dans les années 70. Elle occupe une superficie de 150 jusqu'à 170hectares dans la zone industrielle d'Arzew, sur plateau d'EL Mohgoun, a environ 40 kilomètres d'Oran et 5 km de la mer méditerranée.

La raffinerie a été construite dans le cadre de première plan quinquennal 1970_1973 par un groupe japonais (société japonaise JAPAN GASOLINE CORPORATION). en 1984, d'autres unités ont été rajoutées.

I.2 Capacités de traitement :[3]

La raffinerie d'Arzew, après réhabilitation, traite 3,8 millions tonnes par an de pétrole brut de Hassi-Massoud et 279.000 tonnes par an de Brut Réduit importé (BRI) pour la fabrication des bitumes. Les capacités annuelles de production des différentes unités.

Tableau I.1 : les capacités annuelles de production de la raffinerie d'Arzew.

Produits	Tonnes/an
Propane	15000
Butane	70 000
Essence normale	490 000
Essence super	70 000
Naphta	160 000
Fuel BTS	550 000
Fuel HTS	70 000
Kérosène	120 000
Gazole	980 00
Huiles finis	170 000
Graisse	7 000
Paraffine	4 000
Bitume routier	120 000
Bitume oxydé	20 000

I.3 Présentation des installations de production :

La raffinerie d'Arzew est divisée en plusieurs zones présentées dans la figure suivantes :



Figure I.1: Plan de masse de la raffinerie d'Arzew[3]

I.3.1 Département de production

Les installations de département P1 sont celles construites en 1970. Elles produisent les carburants, les lubrifiants .Ces installation sont constituées de :

- a. **Zone 3 Utilités** : Elle comprend les unités suivantes :

Chapitre I : Présentation de la raffinerie d'Arzew

- **Unité 31** : Production de vapeur et d'électricité.
- **Unité 32** : Production de l'eau distillée.
- **Unité 33** : Circuit d'eau de refroidissement.
- **Unité 34** : Station de pompage d'eau.
- **Unité 35** : Récupération et distribution du gaz combustible.
- **Unité 36** : Unité d'air comprimé.
- **Unité 67** : Réseau incendie.
- **Unité 37** : Production gaz inerte.

b. Zone 4 Carburants : Elle comprend les unités suivantes :

- **Unité 11** : Unité de distillation atmosphérique « Topping ».
- **Unité 12** : Unité de reforming.
- **Unité 13** : Séparation des gaz « GazaPlant ».
- **Unité 17** : Isomérisation des paraffines légères.

c. Zone 7 Lubrifiants : Elle comprend les unités suivantes :

- **Unité 21** : Distillation sou vide.
- **Unité 22** : Désalphatage au propane
- **Unité 23** : Extraction au furfural des aromatique.
- **Unité 24** : Déparaffinage au MEC-Toluène
- **Unité 25** : Hydrofinishing

d. Zone 10 Bitumes : Cette zone est composé de deux ensembles :

- **Unité 14** : Bitumes routiers.
- **Unité 15** : Bitumes Oxydés.

I.3.2 Département de production P2

En 1978, suite aux besoins importants en lubrifiants, la réalisation d'un ensemble de production de 120000T/an d'huile de base fut lancée .Il comprend trios zones :

a. Zone 19 Utilités : Elle comprend les unités suivantes :

- **Unité 1100** : Production de la vapeur
- **Unité 1200** : Production de l'électricité

Chapitre I : Présentation de la raffinerie d'Arzew

- **Unité 1300** : Tour de refroidissement
- **Unité 1400** : Fuel gaz
- **Unité 1500** : Unité d'air comprimé
- **Unité 1600** : Production de l'eau distillée
- **Unité 1700** : La troche
- **Unité 1800** : Traitement des eaux usées de P2
- **Unité 280** : Production de gaz inerte (azote)

b. Zone 5 lubrifiants : Elle comprend les unités suivantes :

- **Unité 100** : Distillation sous vide
- **Unité 200** : Désalphatages au propane
- **Unité 300** : Extraction des aromatiques
- **Unité 150** : HOT OIL
- **Unité 160** : Traitement des eaux acide
- **Unité 400** : Déparaffinage au MEC-Toluène
- **Unité 500** : Hydrofinishing
- **Unité 600** : Hydrotraitement de la paraffine

I.3.3 Département de production P3

a. Zone 6 : fabrication des huiles finies et graisses

b. Unité 3000 : huiles

- **Unité 3100** : blending des huiles
- **Unité 3200** : Graisses
- **Unité 3300** : conditionnement de la paraffine
- **Unité 3600** : remplissage des huiles en vrac
- **Unité 3900** : conditionnement des huiles et de graisse

I.3.4 Département et production P4 :

a. Zone 28 Stockage et expédition

il s'agit du stockage des produits finies comme les carburant, les GPL , ainsi que les additifs chimiques, le brut de hassi –Massoud , puis le mélange du reformat ,LSRN , butane pour l'obtention des essences . Unedernière tache, c'est l'expédition qui se fait par les camions

Chapitre I : Présentation de la raffinerie d'Arzew

(propane, butane, essence, gasoil), par train, soit par canalisation ou par navires au niveau de L'ISP.

b. Zone 27/ U1800 traitement des effluents :

Traitement des rejets de la raffinerie et récupération de sloop.

I.4 Département de sécurité industrielle

a. Service intervention.

b. Service prévention.

I.5 Laboratoire de contrôle :

Durant toutes les étapes de raffinage au niveau des différentes unités, les produits semi-finis et finis sont soumis selon au programme bien défini à un contrôle à qualité rigoureux au niveau du laboratoire.

Chapitre II : les fours industriels

II.1 Définition

Les fours sont des appareils dans lesquels le chauffage des fluides s'effectue par les fumées produites par la combustion d'un combustible liquide ou gazeux, ils sont dits à chauffage direct, car la chaleur des fumées est cédée directement au fluide froid qui circule dans un serpentin tubulaire. Ces fours sont distincts des fours à chauffage indirect, dans lesquels le fluide à réchauffer circule dans un faisceau tubulaire baignant dans un fluide chaud, lui-même chauffé directement par les fumées du combustible.[2]

La chaleur transmise au fluide peut servir :

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

II.2 Rôle des fours dans l'industrie pétrolière[2]

Dans la plupart des installations, l'apport de l'énergie thermique requis par le procédé se fait par l'intermédiaire de fours à chauffage direct dans lesquels l'énergie produite par la combustion est transmise directement au fluide à réchauffer qui circule dans un serpentin tubulaire ou un faisceau tube. Selon l'effet de l'apport de chaleur au fluide de procédé, on peut distinguer :

II.2.1 Les fours de réchauffage sans changement de phase dans lesquels la charge liquide ou vapeur ne reçoit que la chaleur sensible. C'est le cas par exemple :

- _ Des fours des unités de reforming catalytique dans lesquels la charge est en état gazeux (déjà vaporisée à l'entrée du four) et portée à la température nécessaire au déroulement des réactions chimiques sur les lits catalytiques.
- _ Des fours (à huile chaude) utilisés comme fluide caloporteur

Chapitre II : Les fours industriels

_ Des surchauffeurs de vapeur indépendants des fours de vapocraquage quand la vapeur des échangeurs de ligne de transfert n'est pas surchauffée dans la zone de convection.

II.2.2 Les fours de réchauffage de liquide avec vaporisation partielle que l'on rencontre en particulier les unités de distillation : four de distillation sous vide ou atmosphérique, four de remouillage, dans ces fours, la charge reçoit de la chaleur latente pour atteindre le degré de vaporisation requis.

II.3 Description d'un four

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

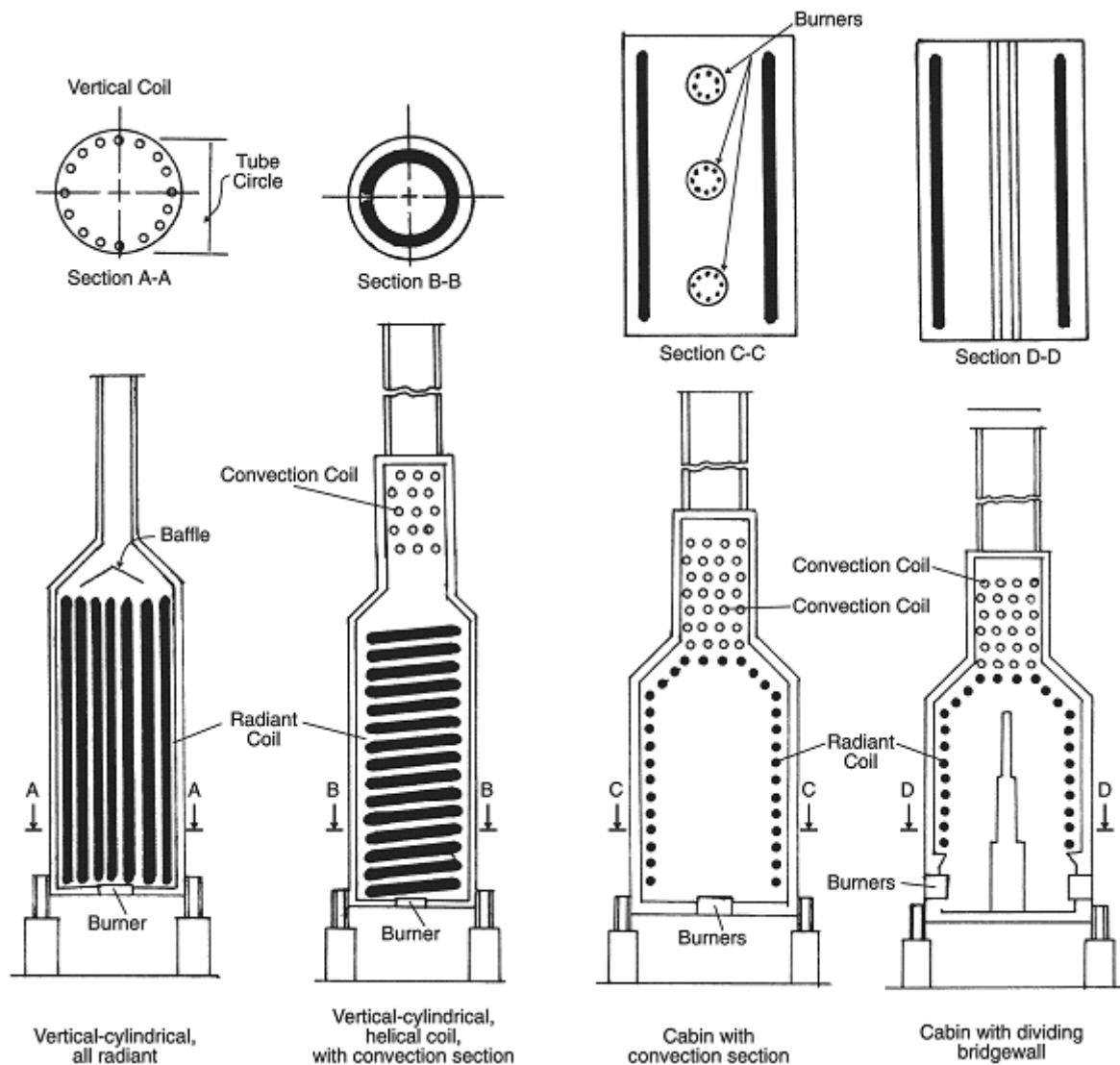


Figure II.1 : Schéma d'un four classique[1]

II. 4 Principaux types des fours

IL existe une grande variété de fours tubulaires qui diffèrent notamment par leur géométrie.

II.4.1 Fours cylindriques verticaux

La figure (II.2) représente une vue d'un four cylindriques vertical. Les brûlures situées sur le sol du four réalisent le mélange air combustible et 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 à 800 °C et de ce fait le rayonnement est plus faible.

Chapitre II : Les fours industriels

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.

La charpente métallique et l'enveloppe métallique du four (le casing) sont protégées de la chaleur par une isolation interne réalisée en briques ou béton réfractaire ou encore en fibre céramique.

Les fours cylindriques verticaux sont caractérisés d'un point de vue géométrique par un axe de symétrie vertical. Pour un four équipé d'un seul brûleur, celui-ci est situé dans l'axe du four, pour obtenir une puissance thermique élevée. Plusieurs brûleurs sont nécessaires, ceux-ci sont disposés sur un cercle 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.

Les puissances thermiques les plus élevées de ces fours sont de l'ordre de 70000t/h, ce qui correspond à la combustion d'environ 7 t / h de combustible.

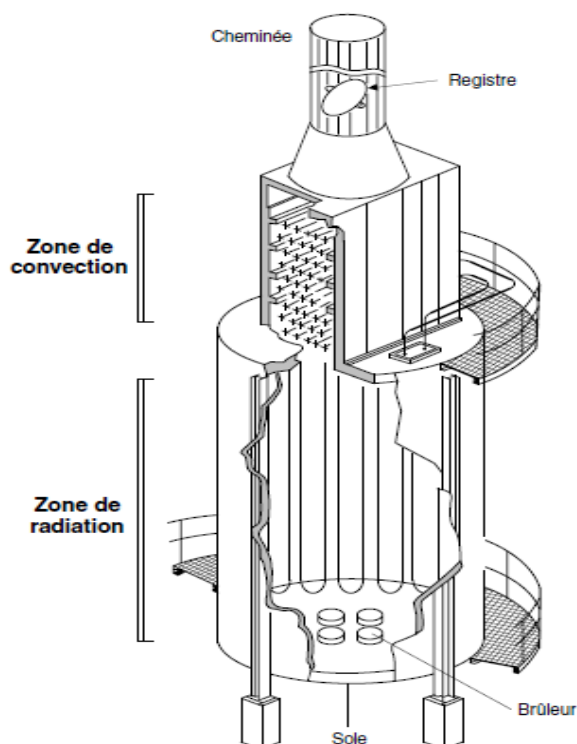


Figure II .2 : une vue écorchée d'un four cylindrique vertical[1]

II.4.2 Fours cabines

II.4.2.a fours cabines à brûleurs sur la sole

La figure (II .3) présente un exemple de four cabine à tube horizontaux

Il se distingue essentiellement du four cylindrique par l'existence d'un plan de symétrie ce qui conduit à disposer un grand nombre de brûleurs sur la sole pour réaliser un véritable rideau de flammes dans le plan médian de la zone de radiation.

La largeur de la zone de radiation est d'environ 6m et la hauteur de 10 à 15 m .La longueur du four dépend de la puissance thermique par le nombre de brûleurs qu'il est nécessaire d'installer. Elle peut atteindre 40m

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.

Dans le cas de fours de faible longueur, les brûleurs peuvent être disposés sur les pignons.

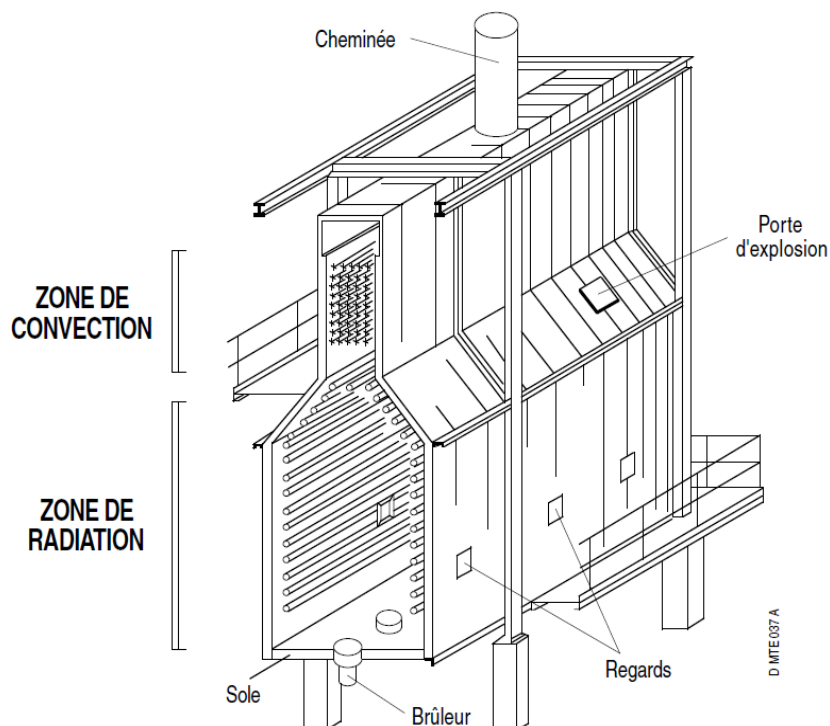


Figure II.3 : Vue d'un four cabine à tube horizontal.[1]

II.4.2.b Fours cabines à brûleurs sur les parois

Certains procédés comme la vapocraquage exigent un apport de chaleur intense au faisceau tubulaire et à un niveau de température élevé. Pour atteindre cet objectif il est nécessaire de répartir l'apport de chaleur sur toute la hauteur du four ce qui conduit à disposer des brûleurs sur toute la surface de la paroi.

Le faisceau tubulaire est alors situé dans le plan médian du four. La zone de convection est utilisée pour préchauffer la charge et la vapeur de dilution et éventuellement pour surchauffer la vapeur produite dans les chaudières de trempe.

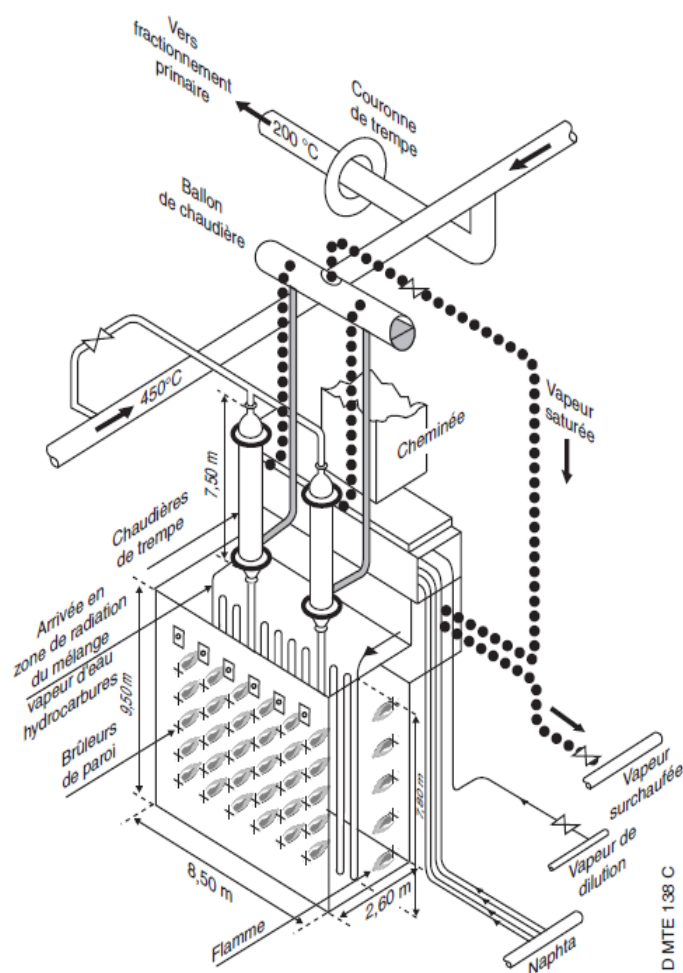


Figure II.4 : vue d'un four cabine à brûleur sur la paroi

II .5 Choix d'un four

Le choix entre le four du type vertical et du type horizontal est principalement dicté par :

II.5.1 La construction

Au-delà d'une capacité de $60 \cdot 10^6$ Kcal/h, les fours cylindriques posent des difficultés de construction (diamètre de 10 à 11 m maximum).

Chapitre II : Les fours industriels

II.5.2 L'encombrement

L'encombrement du four cabine à tube horizontaux est beaucoup plus important que le four cylindrique. En effet la longueur d'un four cabine peut atteindre 27 mètres et nécessite de plus, une zone de dégagement des faisceaux du même ordre.

II.5.3 L'investissement

Le four cabine est général d'un prix de revient supérieur au four vertical pour une même capacité située entre $2 \cdot 10^6$ Kcal/h à $30 \cdot 10^6$ Kcal/h .

Au-delà de cette limite, cette notion est plus discutable.

II.5.4 La conduite

Le four cabine est général d'une exploitation facile, principalement du fait que l'échange de chaleur à travers la radiation est plus homogène.

La hauteur de la zone de radiation d'un four cabine est de l'ordre de 15 m maximum alors qu'elle peut atteindre près de 25 m dans le four cylindrique.

II.5.5 Le raccordement

Les problèmes d'installation de raccordement avec les lignes de transfert du four cabine à tube horizontaux sont complexes.

II.5.7 L'imposition

Le choix entre le four cabine et le four cylindrique est dicté également par la convection propre du client ou du donneur de procédés.

II.5.8 Prix d'un four

Le coût d'un four n'est pas négligeable dans le coût de l'unité. Il est difficile de donner une décomposition précise du coût des principaux sous-ensembles car leur part relative varie en fonction de la nature des matériaux constituant les serpentins ou le degré de désolation demandé.

Les répartitions suivantes sont données à titre indicatif.

Chapitre II : Les fours industriels

Four sans installation de préchauffage d'air

- Charpente 25% à 35%
- Réfractaire 20% à 30%
- Faisceaux 25% à 40%
- Divers 5% à 20%

Four avec installation de préchauffage d'air

- Charpente 25% à 35%
- Réfractaire 15% à 25%
- Faisceaux 20% à 30%
- Divers 5% à 15%

II.6 Rendement d'un four

Les pertes de chaleur à travers les parois du four dépendent de l'épaisseur et de la matière du garnissage réfractaire isolant. Pour un garnissage isolant économiquement optimum, ces pertes sont faibles. Pour un four d'une puissance de 10 KMW ou plus, elles sont de 1 à 2% du pouvoir calorifique intérieur. Ces pertes sont plus importantes pour un petit four, car le rapport de la surface des parois de l'enveloppe, par rapport au volume de la chambre de radiation, diminue lorsque la taille du four augmente.

Les pertes de chaleur les plus importantes sont celles dues au rejet à la cheminée des fumées chaudes. Celles-ci sont le résultat de deux facteurs ; le débit de fumée et leur température. Le débit de fumée s'accroît avec l'excès d'air. Il y'a donc lieu de fonctionner avec un excès d'air aussi faible que possible. Tout en veillant à obtenir une combustion complète, sans imbrûlés un fonctionnement à excès d'air très bas peut conduire à des pertes par imbrûlés plus importantes que le gain réalisé par la réduction, de l'excès d'air. Indépendamment de la perte due à la chaleur latente des imbrûlés, ceux-ci entraînent l'encrassement des surfaces d'échanges et par conséquent, une élévation de la température des fumées qui persiste après le retour à un fonctionnement sans imbrûlés.

Mais la température des fumées constitue le facteur principal des pertes de chaleur d'un four. D'ailleurs, pour des fumées froides, l'excès d'air n'a plus d'importance puisque toute la chaleur cédée à l'air en excès a été récupérée sur les fumées. Pour refroidir les fumées, il est nécessaire de disposer d'un fluide froid à réchauffer. Si le fluide à réchauffer est à

Chapitre II : Les fours industriels

une température élevée qui ne permet pas d'obtenir une température de fumée suffisamment basse, c'est-à-dire un rendement thermique satisfaisant, on peut recourir aux solutions suivantes :

- **Production de vapeur d'eau :** cette solution ne réduit pas la consommation de combustible, mais elle peut être intéressante si la vapeur d'eau peut être valorisée.
- **Recyclage de la chaleur des fumées par réchauffage de l'air de combustion :** les fumées, à leur sortie de la zone de convection, sont refroidies dans un échangeur de chaleur dont le fluide froid est l'air nécessaire au four pour brûler le combustible.

Le réchauffage de l'air de combustion permet d'obtenir un rendement thermique de l'ordre de 90 % du pouvoir calorifique inférieur, mais il nécessite un ventilateur de soufflage d'air. Le refroidissement des fumées est limité par les problèmes de corrosion due à la condensation sulfurique, ayant pour origine la présence de composants sulfureux dans les combustibles brûlés.

Chapitre III : Calcul thermique du four

III .Calcul thermique du four F-01

III.1 spécification du four F-01

Le four F-01 de type cylindrique vertical comprend une zone de radiation et une autre de convection équipé de huit brûleurs à l'air induit ayant le rôle d'apporter de la chaleur complémentaire de l'huile chaude dans le système huile afin d'assurer le fonctionnement correct de l'unité 10, et l'unité de distribution de fuel gaz.

III.2 Equipements

- Direction de la flamme : verticalement vers le haut.
- Air de combustion : tirage naturel ambiant.

III.3Gaz de combustion

- Type : fuel gaz.
- Pression : 2,5 bars.
- Température : ambiante.

III.4Données de départ

- Débit de la charge : $534 \cdot 10^3$ Kg/h.
- Densité : $\rho = 847,33$ Kg/m³
- Température sortie four : $T_s = 300$ °C.
- Rendement : 75 %
- Humidité relative : 45 %
- Température de l'air de combustion : ambiante

Chapitre III : Calcul thermique du four

III.5 Calcule de température d'entrée four[4]

III.5.1 Bilan thermique

La chaleur reçue dans le four est perdue à travers les échangeurs.

$$Q_{RF} = Q_P \dots\dots\dots(III.1)$$

$$\Rightarrow M C_p (T_s - T_e) = Q_{E-08} + Q_{E-09} + Q_{E-01} \dots\dots\dots (III.2)$$

$$\Rightarrow T_e = T_s - \frac{Q_{E-08} + Q_{E-09} + Q_{E-01}}{M \cdot C_p} \dots\dots\dots (III.3)$$

Avec :

Q_{E-08}, Q_{E-09} : quantité de chaleur perdue dans les échangeurs E-08, E-09.

Q_{E-01} : quantité de chaleur perdue dans l'échangeur E-01.

$$Q_{E-01} = m \cdot C_p (t_s - t_e) = 9234 \cdot 0,5765(300 - 205)$$

$$Q_{E-01} = 505723,095 \text{ Kcal/h}$$

L'application de la formule (V.3) donne :

$$T_e = 300 - \frac{6672185,8 + 7162510,28 + 505723,095}{M \cdot C_p}$$

$$T_e = 256 \text{ }^\circ\text{C}$$

III.6 La composition du gaz de combustion

Tableau III.1 - composition du gaz combustible

Composition	N ₂	CO ₂	C ₁	C ₂	C ₃	i-C ₄	n-C ₄	i-C ₅	n-C ₅	C ₆
% mol	2.17	0.92	87.02	8.34	1.16	0.17	0.13	0.04	0.02	0.03

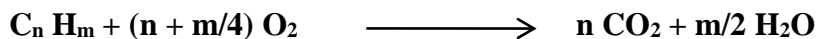
Chapitre III : Calcul thermique du four

En basant sur ces données, on effectue le calcul du four F-01 suivant ces étapes:

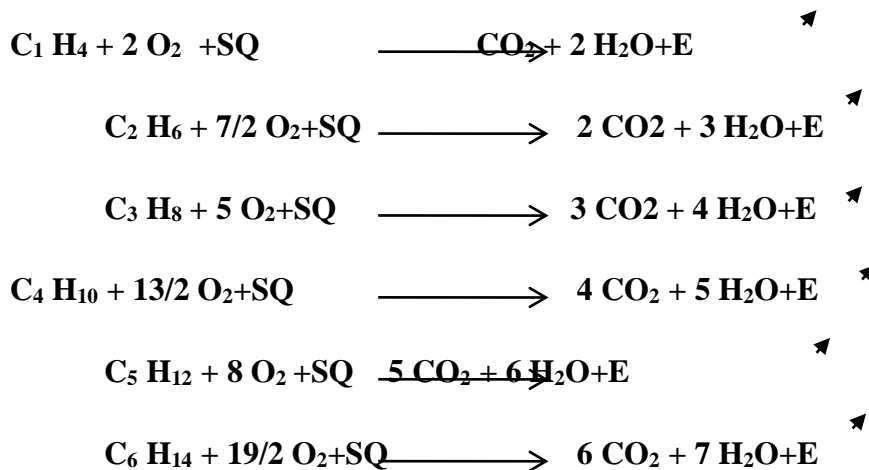
- Calcul de la combustion ;
- Bilan thermique du four F-01 ;
- Calcul de débit de fuel gaz.

III.7 Calcul de la combustion

Le calcul est basé sur l'équation stœchiométrique de la combustion des hydrocarbures ayant la formule suivante :



On détermine d'après cette équation, la quantité théorique d'oxygène nécessaire à la combustion et la quantité des fumées obtenues.



III.7.1 Quantité d'air de combustion et l'excès d'air

- La quantité d'O₂ nécessaire à la combustion de 100 K moles de combustible

Comme la teneur d'O₂ dans l'air est 21 %, alors la quantité d'air théorique

Chapitre III : Calcul thermique du four

$$O_T = 2.87,02 + \frac{7}{2} \cdot 8,34 + 5.1,16 + \frac{13}{2} \cdot 0,3 + 8.0,06 + \frac{19}{2} \cdot 0,03$$

$$O_T = 211,745 \text{ K moles}$$

$$L_T = \frac{100}{21} O_T \dots \dots \dots (III.4)$$

O_T : quantité théorique d' O_2 pour la combustion.

Pour avoir une combustion complète sans présence de CO dans les fumées sortantes du four, il est nécessaire d'introduire dans le four une quantité d'air supérieure à celle nécessaire à la combustion.

$$\alpha = \frac{O_P}{O_T} = \frac{L_P}{L_T} \dots \dots \dots (III.5)$$

O_P : quantité d'oxygène pratique ;

L_T : quantité d'air théorique ;

L_P : quantité d'air pratique.

Ainsi la quantité pratique d' O_2 est calculée comme suit :

$$O_P = \alpha \cdot O_T \dots \dots \dots (III.6)$$

Avec : $\alpha = 1,1 - 1,4$

$$(III.6) \Rightarrow O_P = 1,2 \cdot 211,745$$

$$O_P = 254,094 \text{ K moles}$$

- La quantité d'air pratique

$$(III.4) \Rightarrow L_P = \frac{100}{21} \cdot 254,094$$

$$L_P = 1209,9714 \text{ K moles}$$

- O_2 dans l'excès d'air

Chapitre III : Calcul thermique du four

$$O_2 = O_P - O_T = 254,094 - 211,745$$

$$O_2 = 42,349 \text{ K moles}$$

- % molaire de chaque constituant de la fumée

La teneur en vapeur d'eau dans l'air de combustion à 45 °C est donnée par l'équation d'AVOGADRO - DALTON :

$$\frac{P_{H_2O}}{P - P_{H_2O}} = \frac{N_{H_2O}}{N_{air}} \dots\dots\dots(III.7)$$

La tension de vapeur d'eau à 45 °C est égale à 24 mm Hg. Compte tenu de l'humidité relative à 45 %, le nombre de mole de l'eau est égal :

$$(III.7) \Rightarrow N_{H_2O} = \frac{24}{760 - 24} \cdot 1209,9714 \cdot 0,45$$

$$N_{H_2O} = 17,755 \text{ K moles}$$

- La quantité des produits de combustion (composition de la fumée)

$$N_{CO_2} = 87,02 + 2.8,34 + 3.1,16 + 4.0,3 + 5.0,06 + 6.0,03 + 0,92$$

$$N_{CO_2} = 109,78 \text{ K moles/100 k moles de gaz combustible}$$

$$N_{H_2O} = 2.87,02 + 3.8,34 + 4.1,16 + 5.0,3 + 6.0,06 + 7.0,03 + 17,755$$

$$N_{H_2O} = 223,525 \text{ K moles/100 k moles de gaz combustible}$$

$$N_{N_2} = L_P - O_P = 1209,9714 - 254,094$$

$$N_{N_2} = 958,0474 \text{ K moles/100 k moles de gaz combustible}$$

$$N_{fumée} = N_{N_2} + N_{H_2O} + N_{CO_2} + O_2 \text{ (en excès)}$$

$$N_{fumée} = 958,0474 + 223,525 + 109,78 + 42,349$$

Chapitre III : Calcul thermique du four

$N_{fumée} = 1333,7014$ K moles/100 k moles de gaz combustible

$$CO_2 \% = N_{CO_2} \cdot \frac{100}{N_{fumée}} = 109,78 \cdot \frac{100}{1333,7014} = 8,2312\%$$

$$H_2O \% = N_{H_2O} \cdot \frac{100}{N_{fumée}} = 223,525 \cdot \frac{100}{1333,7014} = 16,759\%$$

$$N_2 \% = N_{N_2} \cdot \frac{100}{N_{fumée}} = 958,0474 \cdot \frac{100}{1333,7014} = 71,833\%$$

$$O_2 \% = N_{O_2} \cdot \frac{100}{N_{fumée}} = 42,349 \cdot \frac{100}{1333,7014} = 3,1753\%$$

- Masse molaire de la fumée (M_f)

$$M_f = \sum M_i \cdot y_i = 44 \cdot 0,082312 + 18 \cdot 0,16759 + 28 \cdot 0,71833 + 32 \cdot 0,031753$$

$$M_f = 27,767 \text{ Kg/K moles}$$

- Masse volumique de la fumée aux conditions normales (ρ_f)

$$\rho_f = \frac{M_f}{22,4} = \frac{27,767}{22,4}$$

$$\rho_f = 1,239 \text{ Kg/N.m}^3$$

- Volume des fumées par la combustion de 1 N.m³ de gaz de combustible (V_f)

$$V_f = \frac{M_f \cdot N_f}{\rho_f} = \frac{27,767 \cdot 1333,7014}{1,239}$$

$$V_f = 29,874 \cdot 10^3 \text{ m}^3/100\text{K moles de gaz}$$

- Volume des fumées

$$100 \text{ K moles de gaz } \rightarrow 100 \cdot 10^3 \cdot \frac{22,4}{22,4} \text{ litre} = 2240 \text{ Nm}^3$$

$$V_f = \frac{29,874 \cdot 10^3}{2240}$$

$$V_f = 13,336 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \text{ gaz de combustible}$$

Chapitre III : Calcul thermique du four

- Masse molaire du gaz combustible (M_{com})

$$M_{com} = \sum M_i Y'_i$$

$$M_{com} = 16. 0, 8702 + 30. 0, 0834 + 44. 0, 0116 + 58. 0,003 + 58. 0,0006 \\ + 72. 0,0006 + 86. 0, 0003 + 44. 0,0092 + 28. 0,0217$$

$$M_{com} = \mathbf{18,1910 \text{ Kg/K moles}}$$

- Masse volumique du gaz combustible aux conditions normales (ρ_{com})

$$\rho_{com} = \frac{M_{com}}{22,4}$$

$$\rho_{com} = \mathbf{0.8121 \text{ Kg/Nm}^3}$$

- Masse molaire de l'air humide

$$M_{air\ humide} = \frac{N_{air} \cdot 29 + N_{H_2O} \cdot 18}{N_{air}} = \frac{1209,9714 \cdot 29 + 17,755 \cdot 18}{1209,9714}$$

$$M_{air\ humide} = \mathbf{29,2641 \text{ Kg/K moles}}$$

- Le débit d'air pour la combustion de 1 Kg de gaz combustible

$$L_P = 1209,9714 \text{ K moles}/100\text{Kmolesde gaz}$$

$$L_p = \frac{1209,9714}{18,191 \cdot 100}$$

$$L_P = \mathbf{0,66514 \text{ K moles/Kg de gaz}}$$

$$L_{Psec} = 0,66514 \cdot 29$$

$$L_{Psec} = \mathbf{19,2891 \text{ Kg d'air sec/Kg de gaz}}$$

$$L_{P\ humide} = 0,66514 \cdot 29,2641$$

$$L_{P\ humide} = \mathbf{19,4647 \text{ Kg d'air sec/Kg de gaz}}$$

Chapitre III : Calcul thermique du four

- Masse volumique de l'air humide aux conditions normales ($\rho_{air\ humide}$)

$$\rho_{air\ humide} = \frac{M_{air\ humide}}{22,4} = \frac{29,26413}{22,4}$$

$$\rho_{air\ humide} = 1,3064 \text{ Kg/Nm}^3$$

- La quantité de fumées rapportée à 1 Kg de gaz combustible

1- en négligeant l'humidité de l'air

$$G_f = L_{p\ sec} + 1 \text{ Kg de gaz} = 19,2891 + 1$$

$$G_f = 20,2891 \text{ Kg/Kg de gaz combustible}$$

2- on ne néglige pas l'humidité de l'air

On peut calculer la quantité de fumées par la combustion de 1 Kg de gaz combustible comme suit :

$$G_f = V_f \cdot \frac{\rho_f}{\rho_G} = 13,336 \cdot \frac{1,239}{0,81209}$$

$$G_f = 20,346613 \text{ Kg/Kg de gaz combustible}$$

Donc la quantité d'air $L_{réel}$

$$L_{réel} = 20,346613 - 1 = 19,346613 \text{ Kg d'air/Kg de gaz}$$

Tableau III.2 – Résultats calcul de la combustion

Chapitre III : Calcul thermique du four

composant du combustible	%mol	O2 pour la combustion K mole	composition des fumées				composant du combustible
			CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	
N ₂	2.17	-	-	-	-	2.17	N ₂
CO ₂	0.92	-	0.92	-	-	-	CO ₂
CH ₄	87.02	174.04	87.02	174.04	-	-	CH ₄
C ₂ H ₆	8.34	29.19	16.68	25.02	-	-	C ₂ H ₆
C ₃ H ₈	1.16	5.8	3.48	4.64	-	-	C ₃ H ₈
I-C ₄ H ₁₀	0.17	1.105	0.68	0.85	-	-	I-C ₄ H ₁₀
n-C ₄ H ₁₀	0.13	0.845	0.52	0.65	-	-	n-C ₄ H ₁₀
I-C ₅ H ₁₂	0.04	0.32	0.2	0.24	-	-	I-C ₅ H ₁₂
n-C ₅ H ₁₂	0.02	0.16	0.1	0.12	-	-	n-C ₅ H ₁₂
C ₆ H ₁₄	0.03	0.285	0.18	0.21	-	-	C ₆ H ₁₄
TOTAL	100	211.745	108.86	205.77	42.349	955.874	Air de combustion
O₂ dans l'excès d'air		42.349	109.78	223.55	43.625	958.044	TOTAL
O₂ dans l'air de combustion		254.094	8.2312	16.759	3.1753	71.833	%molaire
N₂ dans l'air de combustion		958.044	1333.7014				Nombre total de K moles des fumées pour 100 K moles de combustible
Nombre de K moles d'air de combustion pour 100 K moles de gaz combustible		1209.9714					

Chapitre III : Calcul thermique du four

- Calcul du pouvoir calorifique inférieur du gaz combustible (PCI)

Le pouvoir calorifique inférieur est donné par la relation suivante :

$$PCI = 8714.C_1 + 15272.C_2 + 21655.C_3 + 27641.C_4 + 32242.C_5 + 34551.C_6 \text{ (Kcal/Nm}^3 \text{ gaz)}$$

C_1, C_2, \dots, C_6 : sont les fractions molaires.

$$PCI = 9220,4391 \text{ Kcal/Nm}^3 \text{ de gaz}$$

Le pouvoir calorifique inférieur pour 1 Kg de gaz combustible est :

$$PCI = \frac{9220,4391}{\rho_G} = \frac{9220,4391}{0,8121}$$

$$PCI = 11353,9621 \text{ Kcal/Kg}$$

II.87 Bilan thermique du four F-01

III.8.1 Détermination de la chaleur totale absorbée dans le four (Q_{abs})

La chaleur absorbée par l'huile dans le four est :

$$Q_{abs} = M.C_P (T_s - T_e)$$

$$Q_{abs} = 534.10^3.0,61 (300 - 256) = 14332,56 \text{ Kcal/h}$$

$$Q_{abs} = 14332,56 \text{ Kcal/h}$$

III.8.2 Détermination de la chaleur libérée par le four (Q_{lib})

La chaleur libérée par le four est déterminée d'après la formule suivante :

$$\eta = \frac{Q_{abs}}{Q_{lib}} \Rightarrow Q_{lib} = \frac{Q_{abs}}{\eta_T} = \frac{14332,56}{0,75}$$

Le rendement du four

$$Q_{lib} = 19110,08 \text{ kcal/h}$$

III.9 Calcul de débit du combustible (B)

$$B = \frac{Q_{lib}}{PCI} = \frac{19110,08}{11353,9621}$$

Chapitre III : Calcul thermique du four

$$B = 1683,119 \text{ Kg/h}$$

- Débit des fumées (F)

$$F = B \cdot G_f = 1683,119 \cdot 20,3466$$

$$F = 34245,789 \text{ Kg/h}$$

- Détermination de la chaleur absorbée dans la zone de radiation (Q_{rad})

La chaleur absorbée dans la zone de radiation est calculée en fonction du flux de chaleur moyen développé dans la radiation (ϕ_{moy}) et la surface d'échange (S_{ech}) d'après la formule suivante :

$$\phi_{moy} = \frac{Q_{rad}}{S_{ech}}$$

$$S_{ech} = \pi \cdot L_{eff} \cdot D_{ext} \cdot N_t$$

Avec :

L_{eff} : Longueur effective des tubes (exposée au flamme), $L_{eff} = 16,4 \text{ m}$.

D_{ext} : Diamètre extérieur des tubes, $D_{ext} = 0,1413 \text{ cm}$.

N_t : Nombre des tubes, $N_t = 80$

$$S_{ch} = 3,1416 \cdot 16,4 \cdot 80 \cdot 0,1413$$

$$S_{ech} = 582,406 \text{ m}^2$$

$$\text{Aors: } Q_{rad} = \phi_{moy} \cdot S_{ech} = 16000 \cdot 582,406$$

$$Q_{rad} = 9318,496 \text{ kcal/h}$$

Cette chaleur est de 65 % de la chaleur totale absorbée dans le four.

- Détermination de la chaleur absorbée (Q_{con}) dans la zone de convection

La chaleur totale absorbée dans le four est : $Q_{abs} = Q_{rad} + Q_{con}$

Alors :

Chapitre III : Calcul thermique du four

$$Q_{conv} = Q_{abs} - Q_{rad} = 14332,56 - 9318,496$$

$$Q_{conv} = 5014,064 \cdot 10^6 \text{ kcal /h}$$

D'où la chaleur absorbée dans la zone de convection est de 35 % de la chaleur total absorbée dans le four.

Conclusion générale

A partir de ces calculs, nous avons fait ces observations

- Pour assurer une combustion complète, les brûleurs provoquent un mélange intime de l'air et du combustible.
- Pour avoir une combustion complète sans présence de CO dans les fumées sortantes du four, il est nécessaire d'introduire dans le four une quantité d'air supérieure à celle nécessaire à la combustion.
- Réduction de l'excès d'air : par l'installation à la suite de la zone de convection un préchauffeur d'air de combustion, les calories ainsi récupérées permettent d'augmenter la quantité de chaleur libérée ce qui permet une diminution de la consommation du gaz combustible. Mais tout en gardant une limite bien stricte de cette réduction. Cette dernière peut toutefois être obtenue, En utilisant des brûleurs soignés réalisant un bon mélange de l'air et de combustion en particulier par la turbulence de l'écoulement imposé à l'air, celui étant nécessairement admis sous pression.
- La chaleur absorbée dans la zone de radiation est calculée en fonction du flux de chaleur moyen développé dans la radiation et la surface d'échange.

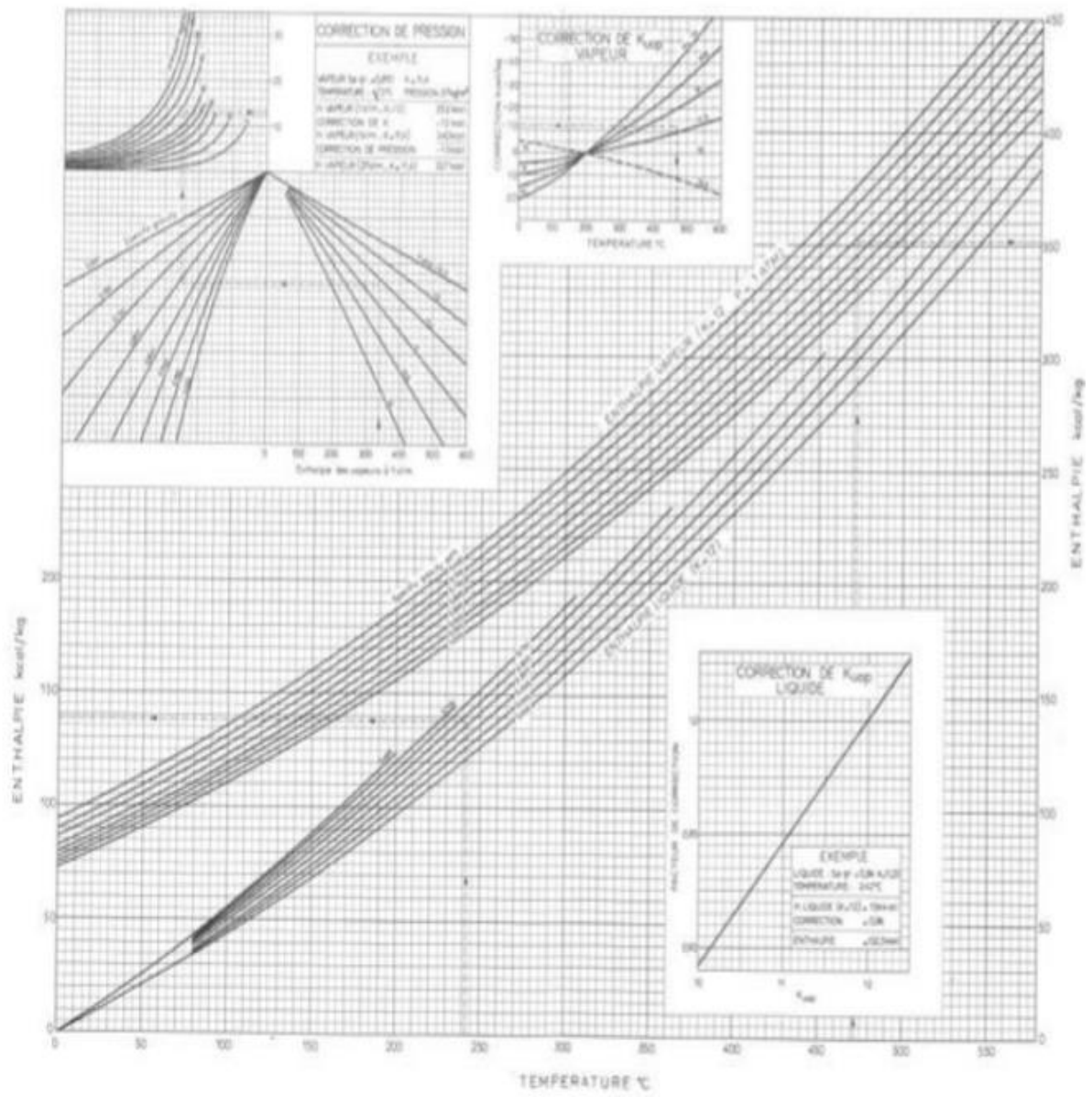
Références et bibliographiques

[1] LE LELIVRE2000 ENSPM Formation Industrie -RÔLE DESCRIPTION ET PRINCIPAUX TYPES DE FOURS

[2]Étude des fours pétroliers et pétrochimiques - J. Le Noguès - Google Livres.

[3] Le raffinage de pétrole : pétrole brut, produit pétrolier, schéma de fabrication –J.P.WAUQUIER

[4] Mémoire calcul de vérification du four H101 . LARBI, ikram; OULDABDALLAH, Fatima (2021-07-25)



Annexe III.1 : abaque générale des fractions pétrolières .

Composé	PCI _m (kJ/kg)	Composé	PCI _m (kJ/kg)
Paraffines		Acétyléniques	
Méthane	50 009	Acétylène	48 241
Ethane	47 794	Méthylacétylène	46 194
Propane	46 357	Butyne-1	45 590
Butane	45 752	Pentyne-1	45 217
Pentane	45 357	Aromatiques	
Hexane	44 752	Benzène	40 170
Heptane	44 566	Toluène	40 589
Octane	44 427	o-Xylène	40 961
Nonane	44 311	m-Xylène	40 961
Décane	44 240	p-Xylène	40 798
Undécane	44 194	Ethylbenzène	40 938
Dodécane	44 147	1,2,4-Triméthylbenzène	40 984
Isoparaffines		Propylbenzène	41 193
Isobutane	45 613	Cumène	41 217
Isopentane	45 241	Alcools	
2-Méthylpentane	44 682	Méthanol	19 937
2,3-Diméthylbutane	44 659	Ethanol	28 865
2,3-Diméthylpentane	44 496	n-Propanol	30 680
2,2,4-Triméthylpentane	44 310	Isopropanol	30 447
Naphtènes		n-Butanol	33 075
Cyclopentane	43 636	Isobutanol	32 959
Méthylcyclopentane	44 636	Tertiobutanol	32 587
Cyclohexane	43 450	n-Pentanol	34 727
Méthylcyclohexane	43 380	Ethers	
Oléfines		Oxyde de diméthyle	28 703
Ethylène	47 195	Oxyde de diéthyle	33 867
Propylène	45 799	Oxyde de dipropyle	36 355
Butène-1	45 334	Oxyde de dibutyle	37 798
Butène-2 cis	45 194	Aldéhydes et cétones	
Butène-2 trans	45 124	Formaldéhyde	17 259
Isobutène	45 055	Acétaldéhyde	24 156
Pentène-1	45 031	Propionaldéhyde	28 889
2 Méthylpentène-1	44 799	Butyraldéhyde	31 610
Hexène-1	44 426	Acétone	28 548
Dioléfines		Autres espèces chimiques	
Butadiène 1-3	44 613	Carbone (graphite)	32 808
Isoprène	44 078	Hydrogène	120 971
Dérivés nitrés		Oxyde de carbone	10 112
Nitrométhane	10 513	Ammoniac	18 646
Nitropropane	20 693	Soufre	4 639

Annexe III.2 : pouvoir calorifique inférieur massique PCI