

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences, Technologie et Sciences
de la matière



Département de Génie des Procédés

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat

Spécialité : Génie des Procédés

Option : Génie chimique

Présenté par :

Aicha BEN TEBBA

Aicha TERBAKH

THÈME

*Dimensionnement d'un four pour le
préchauffage du brut avant
dessalage/HBK*

Soutenu publiquement devant le jury : 21/06/2009

Mr. Salah DOUNIT	(UKMO)	Président
Mme. Lamia KATEB	(UKMO)	Examineur
Mr. Lotfi BAAMEUR	(UKMO)	Examineur
Mr Med Hassen SELLAMI	(UKMO)	Rapporteur

Année Universitaire 2008/2009



Dédicace

*C'est tout plein de joie que je dédie ce travail à ceux qui m'ont été
une source d'inspiration et de volonté, à ceux qui m'ont apporté,
amour, encouragement et compréhension pour mener à bien mes
études, ma très chère mère*

A la mémoire de mon père

A ma grande mère

A mon frère « Abd Razzek » et ma sœur « Nadjah »

A ma grande famille

A toutes mes amis

TARBAKH Aicha



DEDICACES

Je dédie ce modeste mémoire :

*A mes très chers parents, pour leurs sacrifices et encouragements,
durant toute la période de mes études.*

A mes très chers frères.

A ma très cher sœur.

A toute la famille grande et petite qu'il soit.

A mes amis.

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de
ce travail.*

BENTEBBA AICHA



Remerciements

*En premier lieu, nous tenons à remercier notre dieu "Allah",
notre créateur pour nous avoir la force pour accomplir ce travail.*

*Nous adressons nos vifs remerciements à notre encadreur Mr
SELLAMI HASSEN pour nous avoir diligentés tout au long de ce
travail, pour sa compréhension, sa patience, sa compétence, et ces
remarques qui nous ont été précieuses.*

*Nous tenons à remercier également, le président de jury et les
membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de
juger et d'évaluer notre travail, ainsi qu'aux enseignants du
département de génie des procédés.*

*Nous tenons à remercier également, tout le personnel en
HAOUD BERKAOUI et particulièrement Mr Salim
BENTEBBA, les ingénieurs ALMI et DEOUADI qui nous
aident toute la période de stage.*

*Nos derniers remerciements, vont à tous ceux qui ont contribué de
près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.*

*Merci à tous
Merci pour tout
L'ensemble du binôme*

ملخص:

يخضع تسويق البترول الخام حاليا لعقود بين المنتجين، الناقلين، وأصحاب التكرير، حيث تحدد فيه على وجه الخصوص مستويات الملح والماء.

طريقة العلاج الكيميائي لمكافحة الملوحة ومكافحة البارافين شتاء في حوض بركاوى مكلفة وأحيانا قليلة الفعالية. و عليه فان تركيب فرن لتسخين الخام أمر ضروري. أدت الحسابات المتعلقة بالفرن إلى الحصول على ما يلي : ارتفاع الفرن 22,92 م، و يتكون من منطقتين للتبادل الحراري : منطقة الإشعاع تحتوي على (38 أنبوب) و منطقة الحمل الحراري تحتوي على (48 أنبوب)، كما يوصى بتركيب الفرن بمدخل الوحدة

Résumé :

Actuellement la commercialisation des bruts est régie par des contrats liant les producteurs, les transporteurs et les raffineurs, et fixant en particulier les teneurs en sel et en eau.

En hiver à HBK le traitement chimique par des agents anti salinité et anti paraffine destiné pour éviter le dépôt de sels contenus dans le brut est parfois chère et moins efficace.

Le calcul et le dimensionnement d'un four tubulaire pour le préchauffage du brut est une nécessité.

Le calcul a abouti à un four tubulaire d'une hauteur de 22.92m comprenant deux zones de transfert radiation et convection, ce four doit être installé en amont de l'unité de production afin de résoudre le problème rencontré

Dédicaces
Remerciement
Résumée

SOMMAIRE

Introduction	01
Problématique	02

Partie technologie

Chapitre I : présentation de la région

I.1 Situation géographique	03
I.2 historique	04
I.3 champs de la région	04
I.3.1 Haoud Berkaoui	04
I.3.2 Benkahla	04
I.3.3 Guellala	04
I.3.4 périphérie	05
I.4 protection de l'environnement	07
I.5 présentation administrative	07
a) direction régionale	07
b) dix divisions	09
I.6 centre de production de Haoud Berkaoui	09
I.6.1 séparation	09
I.6.2 stockage	09
I.6.3 expédition	09
I.6.4 section d'injection d'eau	09
I.6.5 unité de compression de gaz de Haoud Berkaoui	12
I.7 développement de la région	14

Partie théorique

Chapitre II : théorie sur le transfert de chaleur

II.1 introduction	16
II.2 conduction thermique	17
II.2.1 concept fondamentaux et équation de la conduction	17
II.2.2 loi de Fourier	18
II.2.3 équation générale de la conduction	19
II.3 convection thermique	20

II.3.1 loi fondamentale de la convection thermique	20
II.3.2 l'équation différentielle de la convection thermique en régime permanente	21
II.3.3 rappel sur le nombre sans dimension	21
II.3.4 formules empiriques en convection thermique	21
II.4 rayonnement thermique	22
II.4.1 rayonnement d'un corps solides	22
II.4.2 rayonnement des gaz	23

Chapitre III : généralité sur les fours

III.1 fonction d'un four	24
III.2 classification	24
III.2.1 fours continus et fours discontinus	24
III.2.2 chauffage direct et chauffage indirect	25
III.2.3 four à haut et à basse température	25
III.2.4 combustible	25
III.3 les fours tubulaires	26
III.3.1 utilisation des fours tubulaires en raffinerie	26
III.3.2 constitution d'un four tubulaire	26
III.3.2.1 faisceaux tubulaires	26
III.3.2.2 supportage des faisceaux tubulaires	27
III.3.2.4 brûleurs	27
III.3.2.5 cheminée	27
III.3.2.6 les accessoires de régulation	28
III.4. différents types de fours tubulaires	28
a) Les fours cylindriques verticaux	28
b) Les fours dits «boîtes» à tubes verticaux	28
c) les fours dits «cabines» à tubes horizontaux	28
d) les fours à chauffage par murs radiants	28
e) les fours dits à double chauffage	28
III.5 le choix d'un type de four tubulaire	35
III.6 description générale des fours	35
III.7 caractéristiques générales des fours tubulaires	36
III.8 l'entretien des fours	36
III.9 avantage des fours modernes	37
III.10 rendement d'un four	37

III.11 pollution et environnement	37
-----------------------------------	----

Chapitre IV : calcul thermique du four

Introduction	41
IV.1 calcul thermique du four	41
IV.1.1 bilan énergétiques	41
IV.1.2 rendement énergétique	41
IV.1.3 rendement de combustion	41
IV.1.4 relation entre le rendement énergétique et le rendement de combustion	42
IV.1.5 rendement des fours continus	43
IV.1.6 détermination des pertes par les parois	43
IV.1.7 calcul de la chaleur accumulée	44
IV.1.8 puissance installée	44
IV.2 dimensionnement des fours	45

Partie calcul

Chapitre V : partie calcul

V.1 calcul de la combustion	49
V.2 bilan thermique	55
V.3 calcul de la zone de radiation	57
V.4 calcul de la zone de convection	62
V.5 calcul de la cheminée	65
VI. interprétation et discussion des résultats	68
VII. Conclusion et recommandation.	
Bibliographie.	
Annexe.	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau N° 1 : Paramètres et conditions de service.

Tableau N° 2 : Composition du gaz combustible.

Tableau N° 3 : Les caractéristiques physico-chimiques du combustible.

Tableau N° 4 : Les caractéristiques physico-chimiques du brut.

Tableau N° 5 : les Caractéristiques des fumées.

Tableau N° 6 : composition des fumées (base : 100 Nm³ de gaz combustible).

Tableau N° 7 : le taux de transfert.

Tableau N° 8 : l'épaisseur utile de la couche de gaz.

Tableau N° 9 : Dimensionnement constructif du four.

Tableau N° 10 : dimensions des tubes.

LISTE DES FIGURES

Fig I.1 : Situation géographique de HBK.....	03
Fig I.2 : Carte des principales accumulations du bloc 438	06
Fig I.3 : Section de séparation.....	11
Fig I.4 : unité de compression de gaz HBK.....	13
Fig II.1 : loi de Fourier.....	18
Fig II.2 : équation générale de la conduction.....	19
Fig II.3 : conduction à travers un mur cylindrique.....	19
Fig III.1: four cylindrique verticale	29
Fig III.2 : les fours boîtes.....	30
Fig III.3 : les fours cabines.....	31
Fig III.4 : les fours à chauffage par murs radiants.....	32
Fig III.5 : les fours dits à double chauffe.....	33
Fig III.6 : tube avec picots.....	39
Fig III.7 : tube avec ailettes radiales.....	40
Fig IV : la puissance installée.....	44

Introduction

INTRODUCTION

Le pétrole brut a une importance capitale dans le monde moderne puisqu'il constitue avec le gaz naturel, la principale source d'énergie.

Le pétrole est une roche liquide carbonée, ou huile minérale. L'exploitation de cette énergie fossile est l'un des piliers de l'économie industrielle contemporaine, car le pétrole fournit le quasi totalité des carburants liquides. Il fournit 60% des besoins énergétiques mondiaux ou autres.

La qualité d'un brut dépend largement de son origine, sa couleur, sa viscosité, sa teneur en soufre, son point d'écoulement et sa teneur en minéraux.

Les hydrocarbures qui composent permettent la fabrication des produits énergétiques comme les lubrifiants, les bitumes et les produits pétrochimiques dont la variété ne cesse d'augmenter (les fibres synthétiques, les matières plastiques, les solvants et détergents).

Le gaz naturel est un combustible fossile, il s'agit d'un mélange d'hydrocarbures présent naturellement dans des roches poreuses sous forme gazeuse.

Avec 23 % de l'énergie consommée en 2005, le gaz naturel est la troisième source d'énergie la plus utilisée dans le monde après le pétrole (37 % en 2005) et le charbon (24 % en 2005). L'usage du gaz naturel dans l'industrie, les usages domestiques puis la production d'électricité, se développait rapidement depuis les années 1970 et était sur le point de devancer le charbon. Cependant, avec le renchérissement observé depuis le début du XXI^e siècle, les tassements dans la consommation des pays développés, les besoins des pays émergents et les progrès réalisés dans le traitement du charbon, ce dernier tend à retrouver un certain essor.

PROBLEMATIQUE

Actuellement la commercialisation des bruts est régie par des contrats liant les producteurs, les transporteurs et les raffineurs, en fixant en particulier les teneurs en sel et en eau.

La salinité de brut est très variable d'un champ à un autre.

La chute de température et de pression pendant la production favorise la précipitation des paraffines qui se déposent dans le tubing ou en surface.

Ces paraffines sont constituées d'hydrocarbures contenant de 10 à 40 atomes de carbone. Selon le nombre de carbone qu'elles contiennent elles cristallisent dans plusieurs systèmes et certaines d'entre elles changent de système cristallin avec le temps.

Dans le champ de HBK les eaux produites avec le pétrole sont chargées de différents sels. Les sels les plus prédominants sont chlorure de sodium ($\text{NaCl}=70\%$) et (30% autres sels tels que dichlorure de magnésium (MgCl_2), de dichlorure de calcium (CaCl_2) et de certaines particules solides (SiO_2) argile, résine, sable, sédiment ...). Ces sels sont présents dans le brut sous deux formes :

- Sous forme de cristaux.

- Dissous dans de fines gouttelettes d'eau dispersées dans le brut et forment ainsi une émulsion.

Les dépôts de sel qui se forment au cours de l'exploitation représentent un grand problème pour la production.

La méthode de traitement utilisée à HBK est le traitement chimique par l'injection d'un agent émulsionnant EC2216A (anti salinité) et un anti dépôt de paraffines PROCHINOR AP 104 (qui est très cher) dans l'eau de lavage par une pompe doseuse.

En hiver le traitement des sels n'est pas efficace à cause de la diminution de la température d'huile, cette diminution consiste à former des dépôts de paraffines, ces dernières cachent dans leurs molécules les cristaux de sel et forment une couche isolante des milieux extérieurs ce qui les protègent de l'agent EC2216A.

Sous l'effet de formation des dépôts de paraffines une quantité importante des sels va rester dans l'huile et après un simple chauffage au cours de la production ces sels vont apparaître dans le brut et causer plusieurs problèmes.

Dans ce mémoire on va essayer de dimensionner un four pour le préchauffage de brut comme une solution finale pour éviter ces dépôts.

Partie Technologie

Chapitre I : **Présentation de la région**

I. Présentation de la région

I.1. Situation géographique :

La région de HAUD BERKAOUI (HBK) représente l'une des dix (10) principales zones productrices d'hydrocarbures du Sahara algérien.

Sur la route RN° 49 dites des pétroliers reliant Ghardaïa à Hassi Messaoud, et à 35Km au sud-ouest d'Ouargla, un carrefour indique la présence d'un champ pétrolier, il s'agit de la région de HAUD BERKAOUI. Cette région est située à 100Km de HASSI Messaoud, à 770Km au sud de la capitale (Alger), elle est très importante en raison de sa part de production des hydrocarbures du pays.

Elle s'étend du sud-est de Ghardaïa jusqu'au champ extrême Boukhzana, près de la route de Touggourt.

A ce jour là, 100 puits sont en exploitation, répartis sur l'ensemble des champs, dont 73 puits en gaz lift, et 27 éruptifs. La production cumulée depuis l'origine est de 86 millions de m³, pour des réservoirs globaux en place de 472 millions de m³.

Toutes les quantités d'huiles et de gaz récupérés sont acheminées vers les différents centres de production de la région.

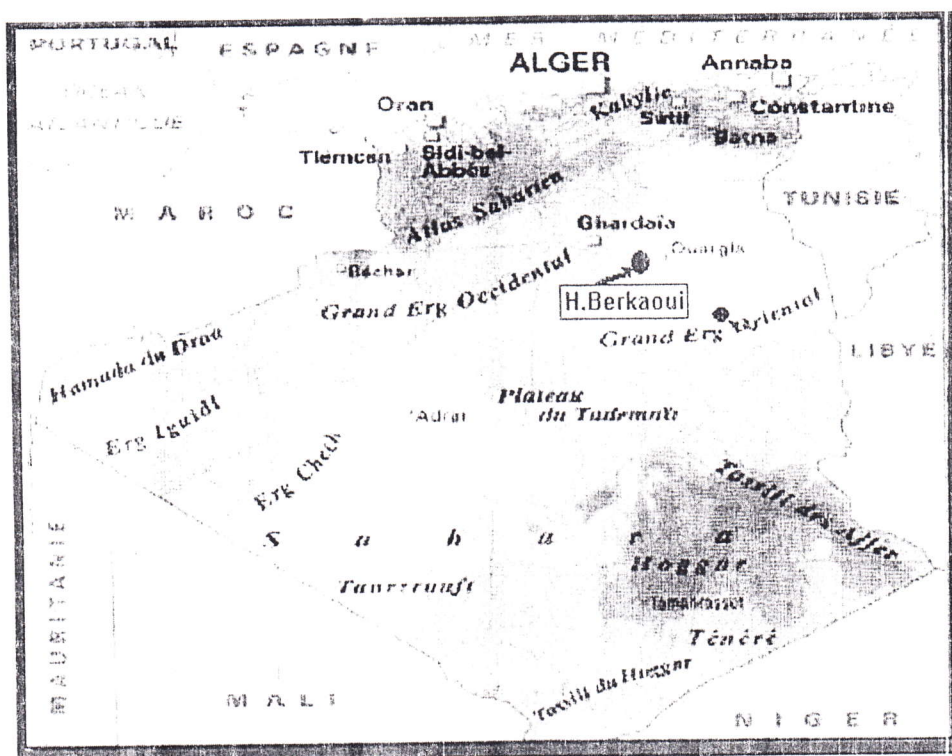


Figure I.1 : situation géographique de HBK

I.2. historique :

Les études géologiques réalisées à Ouargla ont permis de connaître l'existence de deux structures appelées Haoud Berkaoui, et Benkahla.

En mars 1965, un gisement d'huile fut localisé dans la série du trias argilo gréseux (TAG) plus exactement à Haoud Berkaoui par la compagnie française du pétrole algérien (CFPA), la zone pétrolière de Haoud Berkaoui, est constituée de près de 20 champs pétroliers, repartis sur 63 km² sur le bord oriental de la dépression OUED MYA, les plus importants de cette région sont ceux de Haoud Berkaoui, Benkahla, Guellala, elle reforme les accumulations d'huile essentielle de cette zone, la série inférieure du trias argileux Gréseux (TAG) située à une profondeur moyenne de 3350 m, est le principale réservoir, productif d'huile du bloc 438 parmi les autres champs constituant la périphérie de cette région figurent Drâa Tamra (DRT) et Guellala -Nord-est.

Haoud Berkaoui est devenue une région autonome en 1976, alors qu'elle dépendait de la région de Hassi Messaoud, depuis le début de son exploitation.

I.3. Champs de la région :

I.3.1. Haoud Berkaoui :

Sur une superficie de 175 km², ce champ découvert en mars 1965 par la CFPA par le forage du puits OK101, situé au sommet de l'anticlinal. La mise en production de ce gisement a eu lieu en février 1967, la production HBK se compose d'une unité de séparation d'huile avec une capacité de 8000 m³/j, d'une autonomie de stockage de 13000 m³, d'une unité de boosting gaz de 1 million m³/J, et d'une unité de station d'injection d'eau à raison de 6000 m³/j.

I.3.2. Benkahla :

Le gisement de Benkahla a été découvert en novembre 1966 par la même compagnie (FCPA) par le forage du puits OKP24.

Il s'étend sur une superficie de 72 km², le centre de production de Benkahla, est composé d'une unité de séparation d'huile de 5000 m³/J, et d'une unité de boosting gaz de 560000 m³/j, toute la production d'huile de Benkahla est expédiée vers le centre de production HBK.

I.3.3. Guellala :

Ce gisement est découvert le 28 octobre 1969 par le forage de GLA01, sa mise en production en février 1973. (Sa production a été traitée au centre de HBK jusqu'à 'en 1976) (Décembre 1976 démarrage du centre de Guellala/c)

Il s'étend sur une superficie de 35 km², avec une profondeur moyenne des puits de 3500 m.

Actuellement, le centre de production se compose d'une unité de séparation d'huile, d'une capacité de 7000 m³/J, d'une unité de stockage de 15000 m³/j, et d'une unité de boosting gaz de 762000 m³/j.

Cette station est également dotée d'une unité de traitement de gaz d'environ 2,4 millions m³/j, sa capacité de récupération est estimée à 500 tonnes par jour pour le GPL et de 90 tonnes par jour pour les condensât.

Cette unité de traitement est accompagnée d'une unité de compression du gaz commercial à 75 bars, et de 150 bars pour le gaz lift, sa capacité est de 1 660 000 m³/J.

I.3.4. Périphérie :

Elle est composée de plus de 10 puits, la production de quelques puits est assurée par déplétion naturelle, les champs de la périphérie sont : N'gaussa, Drâa Tamra, Guellala Nord-est, Haniet el Beida et Boukhzana.

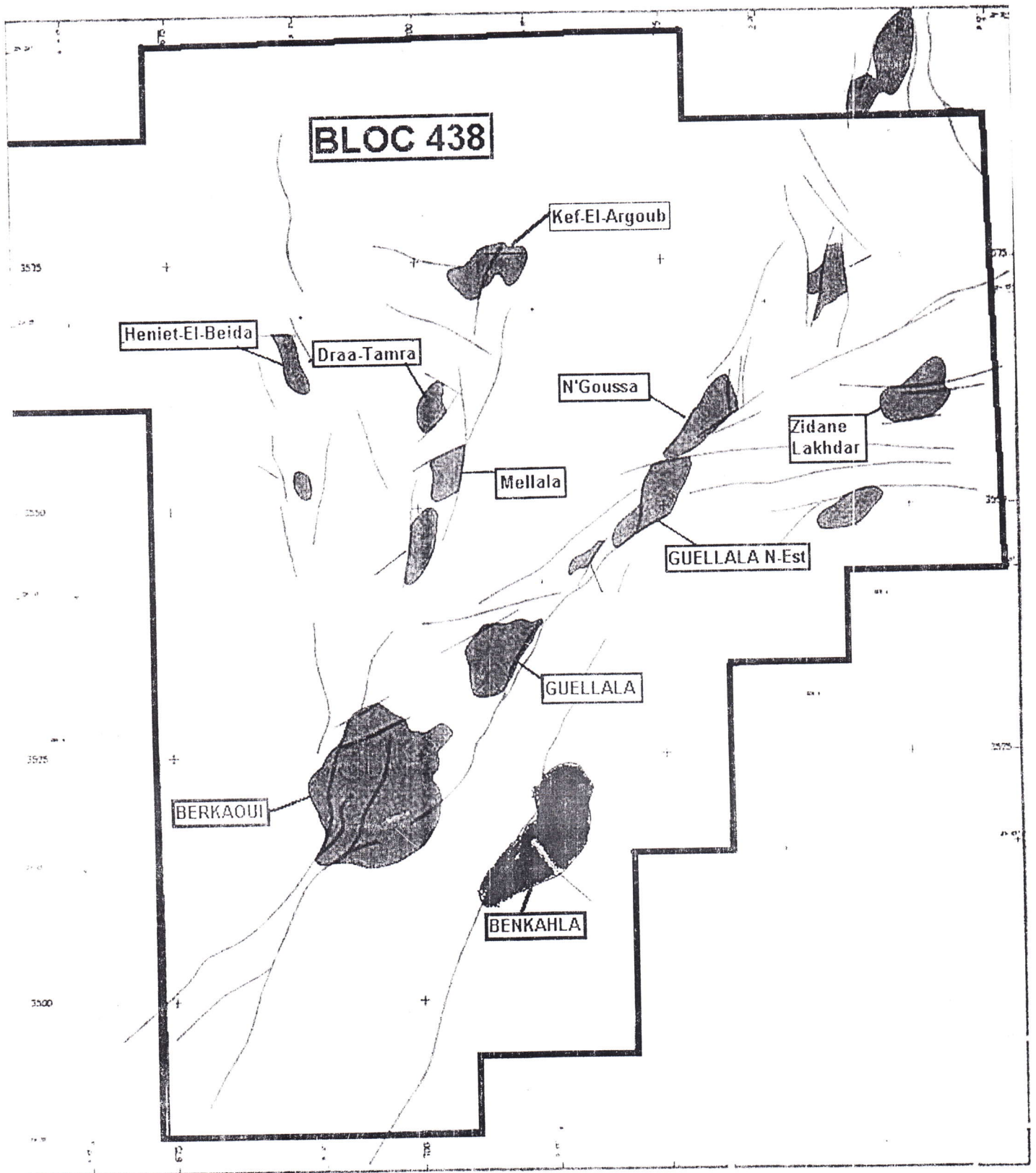


Figure I.2 : Carte des principales accumulations du bloc 438

I.4. Protection de l'environnement :

La région de Haoud Berkaoui est l'une des premières régions à fournir de grands efforts dans le domaine de la protection de l'environnement, cette région est dotée d'une station de déshuilage, d'une unité de récupération des gaz torchés, d'une station d'eau portable, et aura prochainement une station d'épuration des eaux usées.

I.4.1 Données climatiques :

- ❖ La température minimale sous l'abri : 45°C.
- ❖ La température minimale sous l'abri : -5°C.
- ❖ La température souterraine maximale en été (à une profondeur de 1 m) : 38°C
- ❖ La température souterraine minimale en hiver (à une profondeur de 1m) : 18°C.

I.4.2 Humidité relative :

- ❖ Humidité maximale moyenne : 45%.
- ❖ Humidité minimale moyenne : 19%.

I.4.3 Vent :

Vitesse Max du vent : 180 Km/h.(5 m/s),et cela à 10 m au-dessus du sol.

Direction du vent : de Nord-ouest et Sud-ouest.

I.4.4 Altitude :

Le niveau du sol est défini comme point standard, l'altitude du site (niveau fini)

- ❖ HBK ; Niveau de la mer +225 m
- ❖ BKH ; Niveau de la mer +192 m
- ❖ GLA ; Niveau de la mer +222 m

I.5. Présentation administrative :

A) D'une direction régionale :

B) De dix divisions.

A) La direction régionale se compose :

- Directeur régional.
- Secrétariat.
- Cellule informatique.

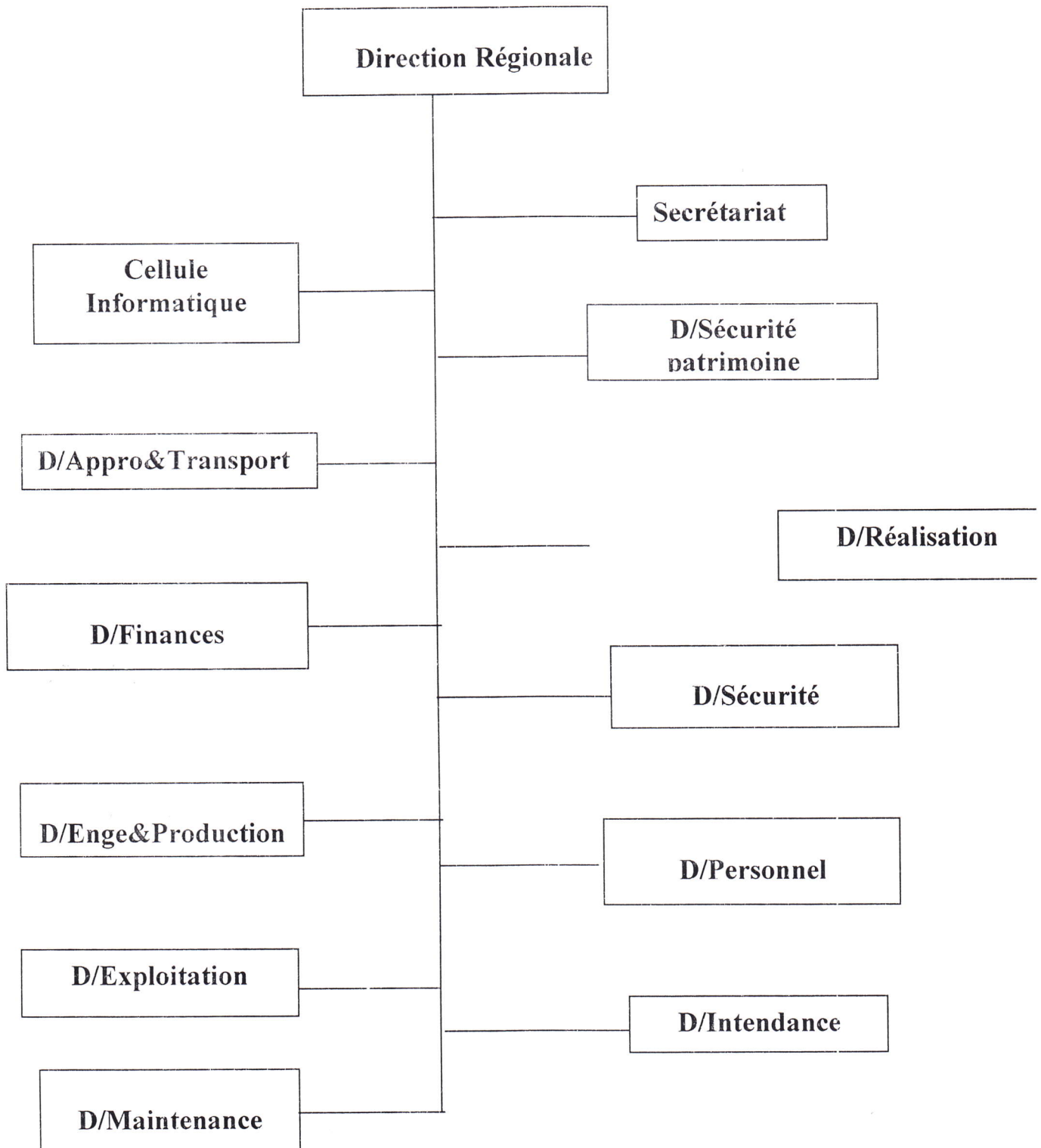
B) Les dix divisions de la région est :

- | | |
|------------------------------|-----------------------------------|
| - Division Appro & Transport | - Division Exploitation. |
| - Division Maintenance. | - Division Personnel. |
| - Division Finance. | - Division Sécurité Industrielle. |
| - Division Réalisation. | - Division Sécurité Patrimoine. |

- Division Intendance.

- Division Engé & Production.

Organigramme de la direction régional de HAOUD-BERKAOUI



I.6 Centre de production de haoud berkaoui :

I.6.1 Séparation:

La section de traitement et de séparation de brut de Haoud Berkaoui est composée de trois batteries de séparation, et d'une batterie teste, chaque batteries est constitué de trois étages de séparation (HP, MP et BP).

Le pétrole brut en provenance des puits producteurs de pétrole, passe à travers le 1^{er} étage de séparation haute pression (séparateur tri phasique HP), ou en élimine les gaz légers et l'eau libre entraînée avec le pétrole.

Le pétrole brut du séparateur HP alimente le 2^{ème} étage de séparation moyenne pression (séparateur MP) pour éliminer les gaz moyens et l'eau en émulsion avec le pétrole.

Le pétrole brut du séparateur MP alimente le 3^{ème} étage de séparation basse pression (séparateur BP) pour éliminer les gaz lourds, une fois le pétrole est stabilisé, alimente la section de stockage ou le pétrole est stocké dans des bacs de stockage à toit fixe. Après une phase de décantation dans les bacs de stockage pour éliminer l'eau en émulsion, le pétrole est expédié vers les raffineries pour être fractionné en plusieurs produits commerciaux.

L'eau des trois étages de séparations est envoyée vers bourbier.

Les gaz des trois séparateurs HP, MP et BP alimentent la section de compression des gaz en prévision de leurs traitements dans les unités de traitement du gaz et production de GPL.

II.6.2 Stockage:

L'huile dégazée est stockée dans six (06) bacs à toit fixe :

- 04 de 2000 m³
- 01 de 5000 m³
- 01 de 4800 m³

II.6.3 Expédition:

L'huile est expédiée par un pipe 10'' vers l'oléoduc 28'' Haoud el Hamra-Arzew au moyen de la pomperiez qui se compose de:

- 02 Groupes turbo pompes.
- 02 Groupes électro- pompes.

II.6.4 Station D'injection D'eau:

Elle entre dans le cadre du maintien de pression du gisement. L'eau produite est acheminée par collectes vers manifold. La totalité d'eau est filtrée puis pompée à 130/150 bars, et par l'intermédiaire de :

- 01 manifold BP.
- 02 Batteries de trois filtres chacune.
- 03 Groupes de pompage HP.
- 01 Manifold HP.

L'eau est alors injectée dans les puits injecteurs du gisement.

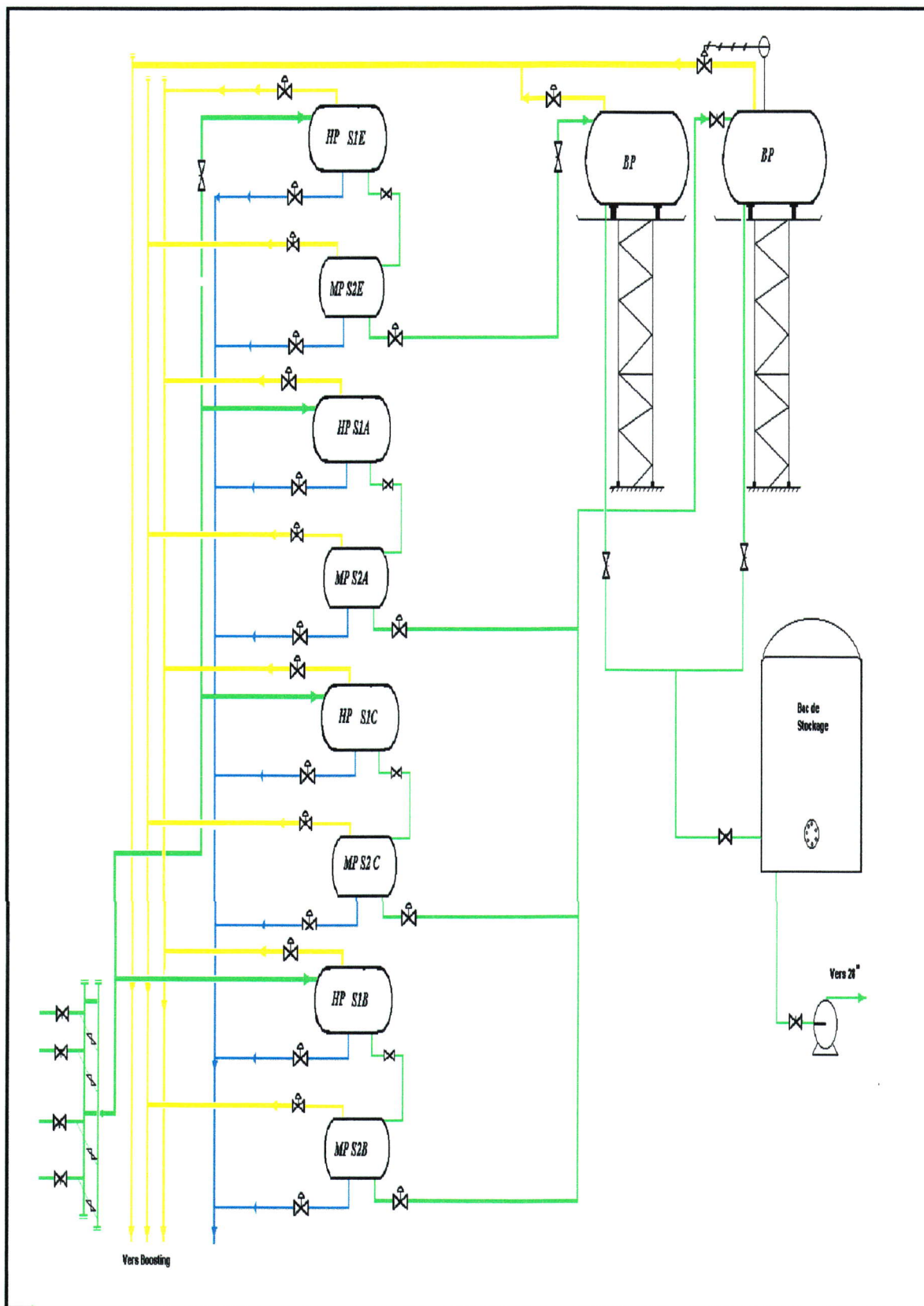


Figure I.3 : Section de séparation

II.6.5 Unité de compression de gaz haoud berkaoui:

La station de Boosting de Haoud Berkaoui se compose de 02 trains de compression ayant chacun une capacité de Boosting correspondant à 50% du débit nominal. Le procédé de chaque train est tel qu'indiqué ci-dessous.

Trois gaz d'alimentation sont disponibles à partir des lignes de torches existantes à la sortie de la séparation HP MP et BP. Le gaz est amené à la tour de lavage d'aspiration BP de Haoud Berkaoui, où une petite quantité de pétrole brut est récupérée. L'huile est recueillie périodiquement dans le ballon de purge et envoyé au séparateur BP existant sous pression du gaz HP.

Après chaque division en deux circuits, chaque gaz BP est pressurisé jusqu'à la pression du gaz MP par les soufflantes de Boosting.

Le gaz BP ainsi comprimé est mélangé avec le gaz MP est introduit dans la premier étage des compresseurs booster à travers les tours de lavage d'aspiration MP, où le pétrole entraîné en est enlevé.

Le gaz HP est transféré tout d'abord aux tours de lavage d'aspiration HP, où le pétrole brut est entraîné, enlevé puis est introduit dans le deuxième étage des compresseurs booster. Après avoir le gaz HP provenant du premier étage des compresseurs booster.

Tout le gaz est comprimés jusqu'à 34.9 bars en été, et 33 bars en hiver à la limite de la batterie booster.

Les compresseurs Booster de Haoud Berkaoui sont du type centrifuge et sont entraînés par moteurs électriques.

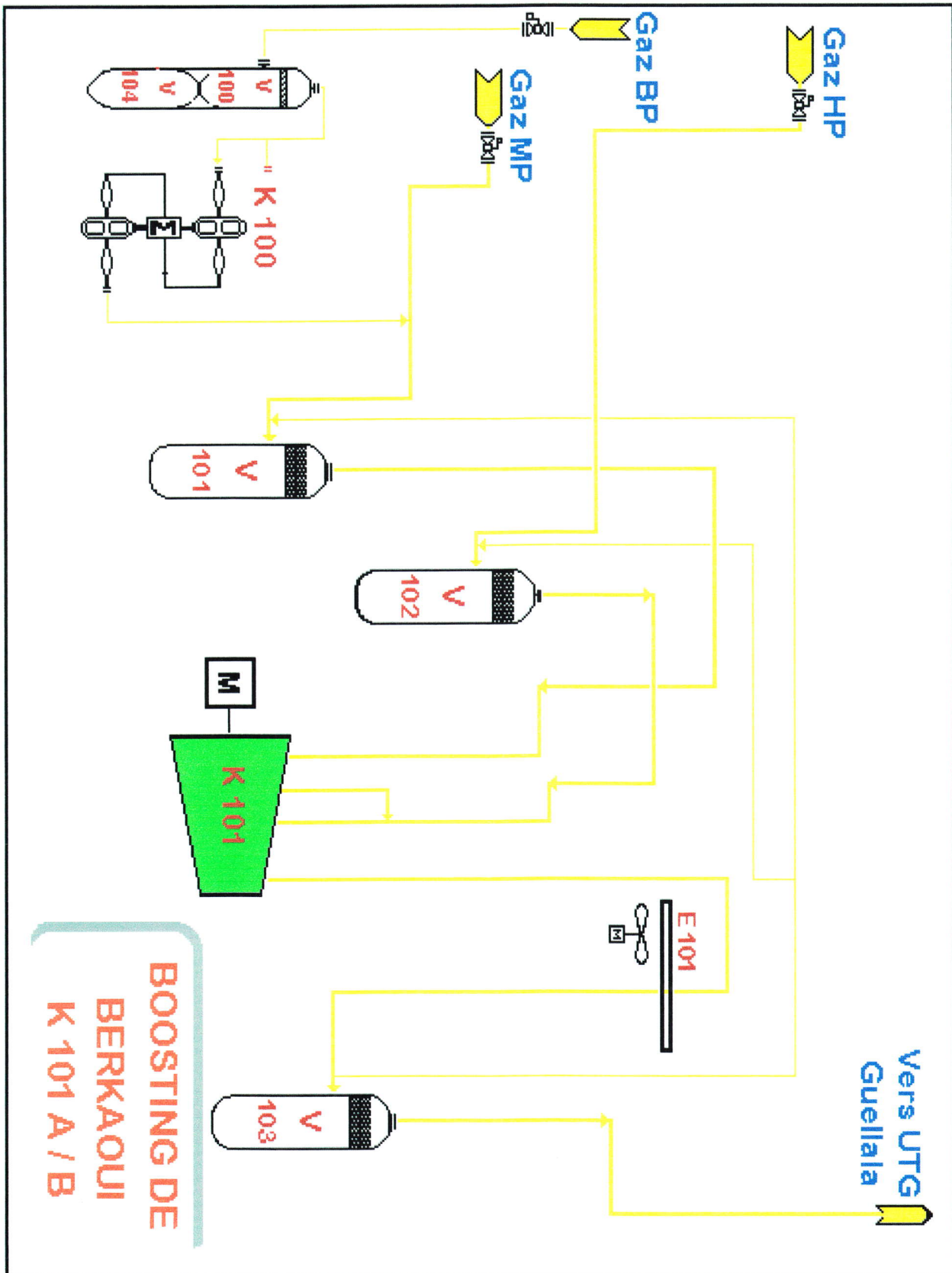


Figure I.4 : unité de compression de gaz HBK

I.7. Développement de la région :

En espace de 30 ans, la région a connu des changements très importants au fur et à mesure de son développement dont voici les plus importants :

- 1963 : Découverte du champ Ouloga par le sondage OAI
- 1965 : Découverte du champ HBK par le sondage OK101, situé au sommet de la structure.
- 1966 : Découverte du champ BKH par le sondage OKP24.
- 1967 : Mise en production d'un centre de traitement d'huile à HBK composé de deux batteries de séparation, trois bacs de stockage et deux motopompes diesel pour l'expédition par la mise du premier puits OK101.
- 1969 : Découverte du champ de GLA par le sondage GLA 01.
- 1970 : Extension du centre de HBK pour recevoir la production de BKH.
- 1971 : Mise en service du centre de BKH.
- 1972 : Découverte du champ GLA-N.E par le sondage GLAN.E 01.
- 1976 : 10 Octobre : Création de la région de Haoud - Berkaoui.
- 1976 : Le 20 Novembre : Mise en service du centre de production de GLA.
- 1977 : Mise en service du service de la production GLA-NE.
- 1978 : Mise en service du centre de traitement de DRT.
- 1981 : Démarrage de l'injection d'eau à HBK, et BKH.
- 1984 : Extension du centre de BKH.
- 1985 : Démarrage de l'unité de traitement des gaz associés à Oued Noumer.
- 1986 : Extension du centre de GLA-NE.
- 1989 : Passation du consigne entre la région HBK et Hassi R'mel pour les champs d'Oued - Noumer.
- 1992 : Mise en service de l'unité de récupération des gaz torchés de HBK, BKH et GLA (booster) et mise en service de l'usine de traitement de gaz à GLA.
- 1993 : Mise en service de nouvelles unités électriques d'injection d'eau à GLA et BKH.
- 1995 : Mise en service de la nouvelle unité électrique d'injection d'eau à HBK.
- 1996 : Mise en service d'une unité de dessalage au centre de HBK.
- 1999 : Découverte du champ de BKHE par le sondage BKHE 1.
- 2001 : Mise en service d'une station de traitement des eaux domestiques (en mars).

- **2002** : Découvert de BKP1 et mise en service Dpt (Consultation dans rapport)
- **2003** : Triennale de l'unité de traitement du gaz GLA
- **2004** : Déplacement des manifolds production et tests vers l'extérieur du centre de production de GLA. Endommagement du bac R01 par une violente tempête à GLA, remplacement des pompes d'expédition du centre production de BKH et de centre de production de GLA-NE
- **2005** : Lancement du projet démolition du bac R01 et construction de trois nouveau bacs 500m³ deux à GLA et un HBK
- **2006** : triennale de l'unité de traitement de gaz, installation de poste blindes à HBK et GLA lancement de projet tableau de bord XP. modification pour raccord aéro gaz lift
- **2007** : extension de projet de récupération de gaz associé, installation DCS des centres de production de HBK, BKH et GLA

Chapitre II :
Théorie sur le transfert de chaleur

THEORIE SUR LE TRANSFERT DE CHALEUR**II.1 introduction :**

Le transfert de chaleur est l'un des modes les plus connus d'échange d'énergie. Il intervient naturellement entre deux systèmes qui existent entre eux une différence de température et cela se fait quelque soit le milieu, qui les sépare. De ce fait, les transferts thermiques ont aussi bien dans le domaine des sciences pures que dans celui des applications technologiques.

Il y a trois modes de transfert de chaleur : [1]

La conduction :

S'il y a contact physique entre les molécules des corps contigus et immobiles on parle de conduction. Le transfert de chaleur correspond alors à la transmission d'une énergie cinétique due aux chocs élastiques des molécules fluides, aux oscillations longitudinales des molécules de solides non conducteurs d'électricité ou aux mouvements des électrons dans les autres cas. Les lois fondamentales du transfert de chaleur par conduction sont en complète analogie avec celles de la conduction électrique.

La convection :

On parle de transfert par convection, s'il s'agit de fluides en mouvement et que la transmission de chaleur accompagne le déplacement de filets d'un seul fluide ou s'opère par mélange des deux fluides. Ce mode de transfert est donc essentiellement régi par les lois des écoulements des fluides, ainsi que par celles de la conduction.

Le rayonnement :

Tout corps porté à une température supérieure au zéro absolu (0K) rayonne, dans toutes les directions, une énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. Inversement tout corps est susceptible d'absorber tout ou une partie d'une énergie électromagnétique analogue à celle qu'il serait susceptible d'émettre. Cette forme de transfert de chaleur nécessite donc, entre les corps considérés, aucun support matériel et s'identifie parfaitement à la propagation de la lumière, c'est-à-dire à l'optique.

En réalité, tout échange thermique s'effectue simultanément sous les trois formes précédentes mais, généralement, l'une d'elle est prédominante et les autres peuvent être négligées. Cependant, lorsque les trois modes de transfert sont concurrents, il est nécessaire d'écrire que l'échange est la somme des trois effets.

Dans l'industrie chimique le mode de rayonnement les plus répandus est le rayonnement de Gaz combustion. On le trouve surtout dans les applications thermiques des fours industriels.

II.2.conduction thermique: [2]

La conduction thermique est la propagation de la chaleur, de molécule à molécule, dans un corps ou dans plusieurs corps contigus et non réfléchissants, sans qu'il y ait mouvement du milieu ou que ce mouvement intervienne dans la transmission

Dans un four, la conduction intervient principalement :

- dans les parois isolantes de l'enceinte du four.
- dans les parois des tubes constituant la surface d'échange.

II.2.1. Concepts fondamentaux et équation de la conduction : [3]

Nous abordons dans cette partie les éléments de base du transfert de chaleur par conduction : champs thermique, loi de Fourier et équation générale de la conduction.

Champs de température :

On peut définir en chaque point M d'un corps solide, liquide, gazeux une température qui est fonction scalaire des coordonnées du point et du temps : $\theta (M, t)$.

Lorsque la température dépend du temps, on dit que le régime thermique est variable. Dans le cas contraire, on dit qu'il est permanent.

Quantité de chaleur, flux et densité de flux thermique :

Quantité de chaleur :

Si on considère une plaque chauffée de manière uniforme sur toutes ses surfaces. dQ est la quantité de chaleur échangée entre cette plaque chauffante et l'air ambiant pendant le temps dt .

Flux thermique :

C'est la quantité de chaleur par unité de temps

$$c = \frac{dQ}{dt}$$

Densité du flux thermique :

C'est la puissance d'échange par unité de surface de cette plaque :

$$\psi = \frac{dQ}{S dt} = \frac{c}{S}$$

Surface isotherme:

Les lieux et les points ayant à chaque instant la même température sont dits surfaces isothermes.

En régime variable, les surfaces isothermes sont mobiles et déformable, en régime permanent, elles sont invariantes.

II.2.2. Loi de Fourier : [1]

Soit dans un corps immobiles, un gradient de température $\partial\theta / \partial X$ suivant une direction normale OX à un élément de surface isotherme dA. Fourier écrit l'expression du flux élémentaire de chaleur Φ pendant le temps dt sous la forme suivante :

$$\Phi = \frac{dQ}{dA \cdot dt} = -\lambda \cdot \frac{d\theta}{dX}$$

λ (W/m. °C) : conductivité thermique du solide

Φ (W) : flux de chaleur

Q : quantité de chaleur transmise

X (m) : coordonnée du point considéré

d θ (°C) : différence de température

A (m²) : surface d'échange

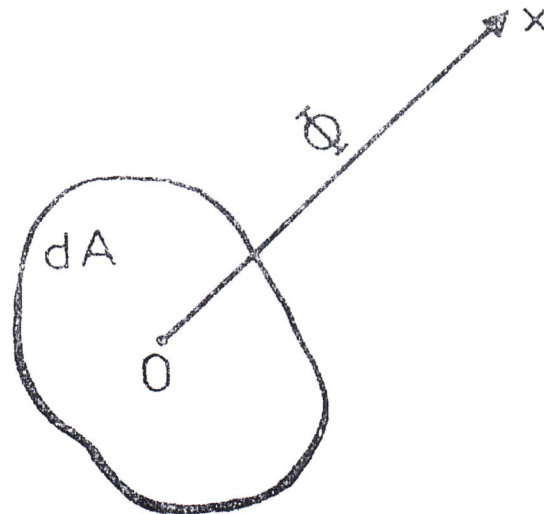


Figure II.1 : loi de Fourier

Le calcul intégral permet de généraliser la loi de Fourier à des corps de forme quelconque. Cette loi traduit le fait que le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température. La direction de l'écoulement de chaleur coïncide avec celle du gradient de température. Le signe (−) caractérise le fait que l'écoulement de chaleur s'effectue dans le sens des températures décroissantes, du chaud vers froid.

En peut écrire la loi de Fourier sous la forme suivant :

$$dQ = -\lambda dA \cdot dt (\text{grad } d\theta)$$

II.2.3. équation générale de la conduction : [1]

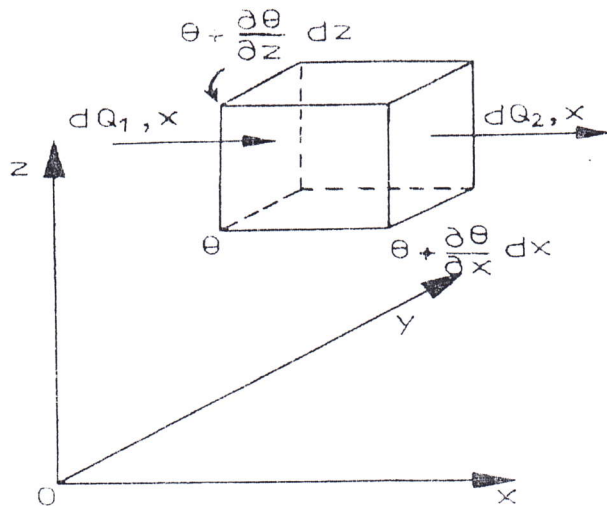


Figure II.2 : équation générale de la conduction

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = a \left(\frac{\delta^2 \theta}{\delta X^2} + \frac{\delta^2 \theta}{\delta Y^2} + \frac{\delta^2 \theta}{\delta Z^2} \right)$$

a : diffusivité thermique = $\lambda / C_p \cdot \rho$

En régime stationnaire :

L'équation de Fourier en régime stationnaire est :

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = 0$$

Donc

$$\left(\frac{\delta^2 \theta}{\delta X^2} + \frac{\delta^2 \theta}{\delta Y^2} + \frac{\delta^2 \theta}{\delta Z^2} \right) = 0$$

Conduction thermique à travers un mur cylindrique en régime stationnaire :

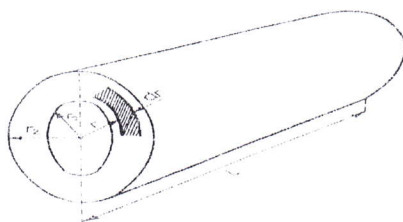


Figure II.3 : conduction à travers un mur cylindrique

L'équation s'écrit sous la forme suivant :

$$Q = \frac{-2\lambda\pi \cdot (T_1 - T_2)L}{Ln \frac{r_2}{r_1}}$$

L : longueur du cylindre

r_1, r_2 : diamètre intérieur et extérieur du tube

λ : conductivité thermique du matériau

T_1, T_2 : température de la paroi intérieure et extérieure du mur

II.3.convection thermique :

La convection est un mode de transfert de chaleur qui se produit uniquement au sein des milieux fluides. Elle apparaît lorsqu'un fluide, solide ou gaz, est en mouvement et présente des inhomogénéités spatiales de température.

La convection thermique est la transmission de chaleur entre un fluide et une paroi avec déplacement relatif apparent du fluide, par rapport à la paroi.

Deux types de convections sont généralement distingués :

La convection naturelle : dans laquelle le mouvement résulte de la variation de la masse volumique du fluide avec la température ; cette variation crée un champ de forces gravitationnelles qui conditionne les déplacements des particules du fluide.

La convection forcée : dans laquelle le mouvement est provoqué par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques ; c'est donc un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules du fluide.

Dans l'industrie, on utilise seulement la convection forcée car la quantité de chaleur transférée par unité de temps et par unité de surface est plus élevée.

II.3.1. Loi fondamentale de la convection thermique : [4]

Le mode de transfert de chaleur par convection est donc essentiellement régi par les lois des écoulements des fluides, ainsi que par celles de la conduction.

La formule de la transmission par convection est donnée par la loi de **NEWTON**

$$Q = h \cdot S (T_s - T_f)$$

h : coefficient de transfert de chaleur par convection.

Ce coefficient dépend de beaucoup de facteurs, sa vitesse, son régime d'écoulement (laminaire ou turbulent), ses grandeurs thermiques ($\lambda, \rho, \mu, C_p, \dots$ etc.), la forme géométrique du corps, l'existence des changements d'état.

II.3.2. L'équation différentielle de la convection thermique en régime permanent :

Cette équation est établie selon le premier principe de la thermodynamique [3]

$$V_x \frac{\partial T}{\partial X} + V_y \frac{\partial T}{\partial Y} + V_z \frac{\partial T}{\partial Z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right)$$

Avec $a = \lambda / C_p \cdot \rho$ diffusivité thermique

Cette équation est proposée par Fourier-Kirshoff

II.3.3. Rappels sur les nombres sans dimension : [5]

Nombre de Reynolds (RE) :

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

v : vitesse moyenne (m/s)

D : diamètre d'écoulement (m)

ρ : masse volumique du fluide (Kg/m³)

μ : viscosité dynamique (Pa. s)

Nombre de Nusselt (NU) :

$$Nu = \frac{h \cdot D}{\lambda}$$

h : coefficient de transfert de chaleur par convection

λ : coefficient de transfert par conduction

D : diamètre de tube

Nombre de Prandtl :

$$Pr = \mu \cdot C_p / \lambda$$

Nombre de Péclet :

$$Pe = Re \cdot Pr$$

Il caractérise la convection forcée

II.3.4. Formules empiriques en convection thermique : [3]

Le phénomène de convection thermique est très compliqué par rapport à la conduction thermique parce que la convection dépend de beaucoup des facteurs et jusqu'à maintenant on n'a pas une formule générale pour la détermination du coefficient de transfert par convection, alors il est déterminé expérimentalement.

Convection à l'intérieur d'un tube : [4]

En régime laminaire : (Re < 2100)

$$Nu = 1,86 (Re \cdot Pr \cdot di / L)^{0,33} (\mu / \mu_w)^{0,14} \text{ (SIDER ET TATE)}$$

d_i : diamètre intérieur de tube (m)

μ_w : viscosité dynamique du fluide à la température de la paroi (Pa.S)

μ : viscosité dynamique du fluide à la température moyenne de la masse du fluide

En régime turbulent : ($Re > 10\,000$)

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} . Pr^{0,33} (\mu / \mu_w)^{0,14} \quad (\text{SIDER ET TATE})$$

Convection à l'extérieur d'un faisceau de tubes, s'écoulant perpendiculairement à ceux-ci :

$$Nu = a (Re)^n . (Pr)^{0,3}$$

II.4. rayonnement thermique :

Les échanges de chaleur par rayonnement se font à distance sans qu'aucun support matériel ne soit nécessaire. Dans la pratique, les échanges se font soit entre corps solide et des gaz chargés de fines particules solides, comme dans le cas des flammes éclairantes. Ces divers mécanismes peuvent aussi apparaître simultanément.

II.4.1. Rayonnement d'un corps solide : [6]

C'est un corps idéal dont la surface absorbe intégralement tout rayonnement électromagnétique incident quels que soient la longueur d'onde et l'angle d'incidence. Pour un tel corps porté à la température absolue (T).

La loi de stefan-boltzman, donne la valeur de l'énergie rayonnée :

$$Q_0 = \sigma . S . T^4$$

Q_0 : énergie rayonné (W / m^2)

T : température absolue (K)

σ : constante de stefan-boltzman = $5,68 . 10^{-8} W/m^2 . K^4$

S : surface d'échange (m^2)

Loi de kirchhoff :

Pour un corps commun, gris et mat, le facteur d'émission totale est égal au facteur d'absorption. Il en résulte que l'exitance d'un corps gris et mat à la température T est égale à l'existence du corps noir à la même température multipliée par son facteur d'absorption totale.

$$Q = a . Q_0 = a . S . \sigma . T^4$$

Q : rayonnement émis sur toutes les longueurs d'onde et dans toutes les directions par un corps mat à la température absolue.

a : pouvoir absorbant total par rapport du corps noir

Rayonnement mutuel de deux surfaces noires ou grises, séparées par un milieu non absorbant.

Les surfaces sont noires :

$$Q = \sigma_0 \mu_{1,2} S_1 (T_2^4 - T_1^4) = \sigma_0 \mu_{2,1} S_2 (T_2^4 - T_1^4)$$

Q : puissance thermique échangée (W)

$\mu_{1,2}$: facteur d'angle projeté sous lequel on voit la surface S_2 à partir de la surface S_1

$\mu_{2,1}$: facteur d'angle projeté sous lequel on voit la surface S_1 à partir de la surface S_2

S : surface (m^2)

Les surfaces sont grises : la puissance échangée peut se mettre sous la forme suivant :

$$Q = \sigma_0 F_{1,2} S_1 (T_2^4 - T_1^4) = \sigma_0 F_{2,1} S_2 (T_2^4 - T_1^4)$$

II.4.2. Rayonnement des gaz :

Dans les fours industriels, seuls les gaz biatomiques à molécules dissymétriques et les gaz tri et polytomiques émettent ou absorbent du rayonnement.

Toutefois, les gaz CO, SO₂, SO₃ et les hydrocarbures C_n H_m sont en très faible concentration dans les fumées et, sauf ces particuliers, on ne considère que CO₂ et H₂O.

Le rayonnement de gaz dépend notamment de la forme et des dimensions du volume de gaz, de la longueur d'onde, de la température.

Rayonnement entre un gaz et une surface noire :

$$Q = \sigma_0 S (\epsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_1^4) \quad [4]$$

α_g : pouvoir absorbant d'un gaz à T_g vis-à-vis d'un rayonnement noir à T_g.

ϵ_g : émissivité totale d'un gaz à température T_g.

Chapitre III: Généralité sur les fours

Les fours industriels [7]

III.1. Fonctions d'un four :

- Un four est un outil utilisé pour élever la température d'un produit. Il peut être soit :
- un équipement destiné uniquement au chauffage (exemple : réchauffage de l'acier avant déformation plastique, réchauffage de pétrole brut avant distillation).
 - Un véritable réacteur dans lequel on élabore les produits (exemple : four de fusion de verre, four de vapocraquage de pétrochimie).

Il s'intègre généralement dans une ligne de production complexe dont il est un des éléments. On trouve des fours dans un très grand nombre d'activités industrielles, ce qui rend une approche globale assez délicate.

III.2. Classification :

Toute classification est arbitraire, elle est toutefois utile dans la mesure où elle permet de retrouver des caractéristiques communes à des équipements, à première vue, très différents. Nous proposons ici quatre classifications, en fonction :

- ✦ De la manutention du produit: fours continus ou discontinus.
- ✦ Du procédé de chauffage : direct ou indirect.
- ✦ Du niveau de température.
- ✦ Du combustible.

III.2.1-Fours continus et fours discontinus :

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

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

C'est le cas :

- des fours de réchauffage de semi-produits (fours à longerons et fours poussant) de la sidérurgie.
- des fours de l'industrie chimique et du raffinage.
- des fours rotatifs de l'industrie cimentée.

Dans un four discontinu, le produit à chauffer est immobile dans le four : il est chargé et déchargé (enfourne et défourne) au même endroit c'est le cas :

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

III.2.2 Chauffage direct et chauffage indirect :

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

a- Four à chauffage direct :

Il y a contact entre les gaz issus de la combustion et les produits à chauffer. Du point de vue thermique, cela entraîne qu'une partie du transfert de chaleur s'effectue par convection. Cette dernière provoque des phénomènes à la surface du produit qui peut lui être préjudiciables.

b-Four à chauffage indirect :

L'interaction entre les gaz de combustion et les produits n'existe plus. Par contre, il s'introduit une résistance supplémentaire au transfert de chaleur qui doit se faire par conduction au travers de la paroi protectrice, puis par rayonnement et éventuellement convection vers la charge. Le problème technologique est alors la tenue de cette paroi qui est portée à haute température et est au contact de la flamme et/ou des gaz à haute température.

III.2.3 Fours à haute et fours à basse température :

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

Exemple : une température de 700 °C sera considérée comme haute dans l'industrie chimique et basse en sidérurgie ou dans l'industrie du verre.

III.2.4 Combustible :

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

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

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

III.3. Les fours tubulaires : [8]

III.3.1 Utilisation des fours tubulaires en raffinerie :

Dans la plupart des installations de raffinerie ou pétrochimie, apport des calories nécessaires au procédé mis en œuvre se fait par l'intermédiaire d'un four à chauffage direct dans lequel les calories produites par la combustion sont transmises par les mécanismes de la radiation, de la conduction et de la convection au fluide à réchauffer qui circule dans un serpentin tubulaire ou un faisceau de tubes, d'où le nom de «fours tubulaires» que l'on donne à ce type d'appareils.

Les usages de ces fours sont multiples mais chaque cas nécessite une étude particulière dans le but de concevoir le four le plus économique et le mieux adapté aux conditions imposées.

On peut citer les exemples suivants:

- 1-réchauffage d'un fluide sans changement de phase.
- 2-réchauffage d'un fluide avec vaporisation partielle.
- 3-réchauffage d'un fluide avec réaction chimique.

III.3.2 Constitution d'un four tubulaire :

III.3.2.1-Faisceaux tubulaires :

Sont généralement constitués de tubes droits, sans soudure, reliés entre eux;

- Par des coudes à 180° soudés sur les tubes, ou
- Par des liaisons spéciales, appelées boîtes de retour, comportant un ou deux orifices fermés par des bouchons.

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 du fluide qu'il contient.

III.3.2.2 Supportage des faisceaux tubulaires :

La libre dilatation des éléments du faisceau tubulaire est à la base des principes du supportage.

Les matériaux utilisés doivent résister ;

- aux fumées;
- à l'oxydation;
- à la corrosion.

III.3.2.3 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 aux variations de température;
- facilite de mise en œuvre.

III.3.2.4 Bruleurs : [9]

La combustion : C'est l'ensemble des réactions chimiques, se produisant au cours de l'oxydation complète ou partielle du carbone, de l'hydrogène, du soufre des combustibles, qui donnent, généralement, naissance à une flamme.

Combustion neutre ; combustion sans excès, ni défaut d'air et sans imbrûlé.

Combustion oxydante ; combustion effectuée avec excès d'air. [10]

La flamme : La flamme est le volume dans lequel s'effectuent les réactions de combustion; il peut être plus grand que la partie visible qui est couramment considérée comme la flamme.

Brûleurs : Les brûleurs ont pour fonction de réaliser la combustion et donc d'assurer;

- Le mélange du combustible et du comburant.
- L'inflammation du mélange.
- La stabilité de la combustion tout en assurant une combustion complète.

III.3.2.5 Cheminée :

Les fumées quittent le four l'intermédiaire de la cheminée en passent, le cas échéant par le réchauffeur d'air. La cheminée de forme cylindrique peut être située directement sur le four ou sur une fondation séparée. Le rôle de la cheminée est multiple, dont le premier bute est de conduire les fumées dans l'atmosphère à un auteur telle quelle ne risquent pas de gêner le Voisinage, mais la cheminée pour son tirage met le chambre de combustion en dépression et provoque ainsi l'entrée de l'air nécessaire à la combustion par les voles d'air, ses dimensions, hauteurs, diamètre doivent donc être calculées pour obtenir ce tirage.

III.3.2.6 Les accessoires de régulation : [11]

Dans le four il y a des accessoires de régulation :

L'amortisseur : installé dans la cheminée pour la régulation de pression dans le four.

Les prise d'air : disposées sur les brûleurs et l'amortisseur pour la régulation de débit en air nécessaire pour la combustion.

III.4. Différents types de fours tubulaires : [4]

Il existe nombreuses disposition des tubes, dans les zone de radiation et de convection, et d'une zone par apport à l'autre. Il en résulte de nombreux types de four :

a-Les fours cylindrique verticaux : la zone de radiation se présente sous la forme d'un cylindre à axe vertical. Les brûleurs sont placés sur la sole, à la base du cylindre. La surface d'échange couvre les parois verticales et présente dans une symétrie circulaire par rapport au groupe de chauffage.

(fig.-III-1-)

b-Les fours dits « boîtes » à tubes verticaux : dans ces fours, la forme générale de la zone de radiation est celle d'un parallélépipède. Les brûleurs sont situés sur la sole, la surface d'échange couvre les parois verticales latérales. (fig. -III-2-)

c- les fours dits «cabines» à tubes horizontaux : dans ces fours la forme générale de la zone de radiation est celle d'un parallélépipède, dont la plus grande longueur est horizontale. Les tubes sont placés horizontalement le long des parois latérales les plus longues .les brûleurs sont situés sur la sole ou sur la partie inférieure des murs latéraux les plus longs.

(fig-III-3 a et b)

d-Les fours à chauffage par murs radiants : la surface d'échange est placée dans le plan médian de la chambre de combustion. Les brûleurs sont répartis sur les parois latérales longitudinales. (fig-III-4-)

e-les fours dits à double chauffe : dans ces derniers, le plan des tubes constituant la surface d'échange, est dans le plan médian des rangs de brûleurs. (fig-III-5-)

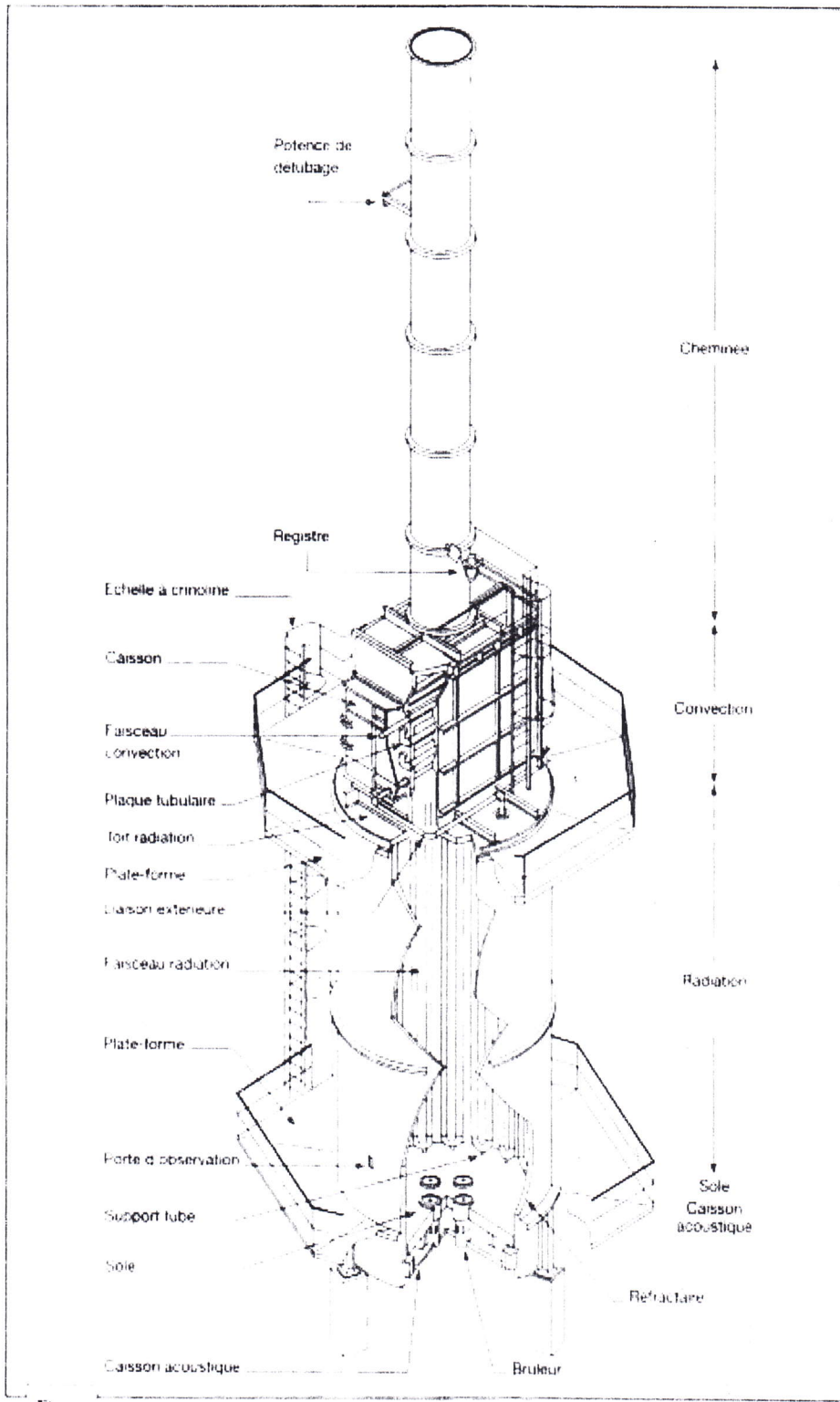
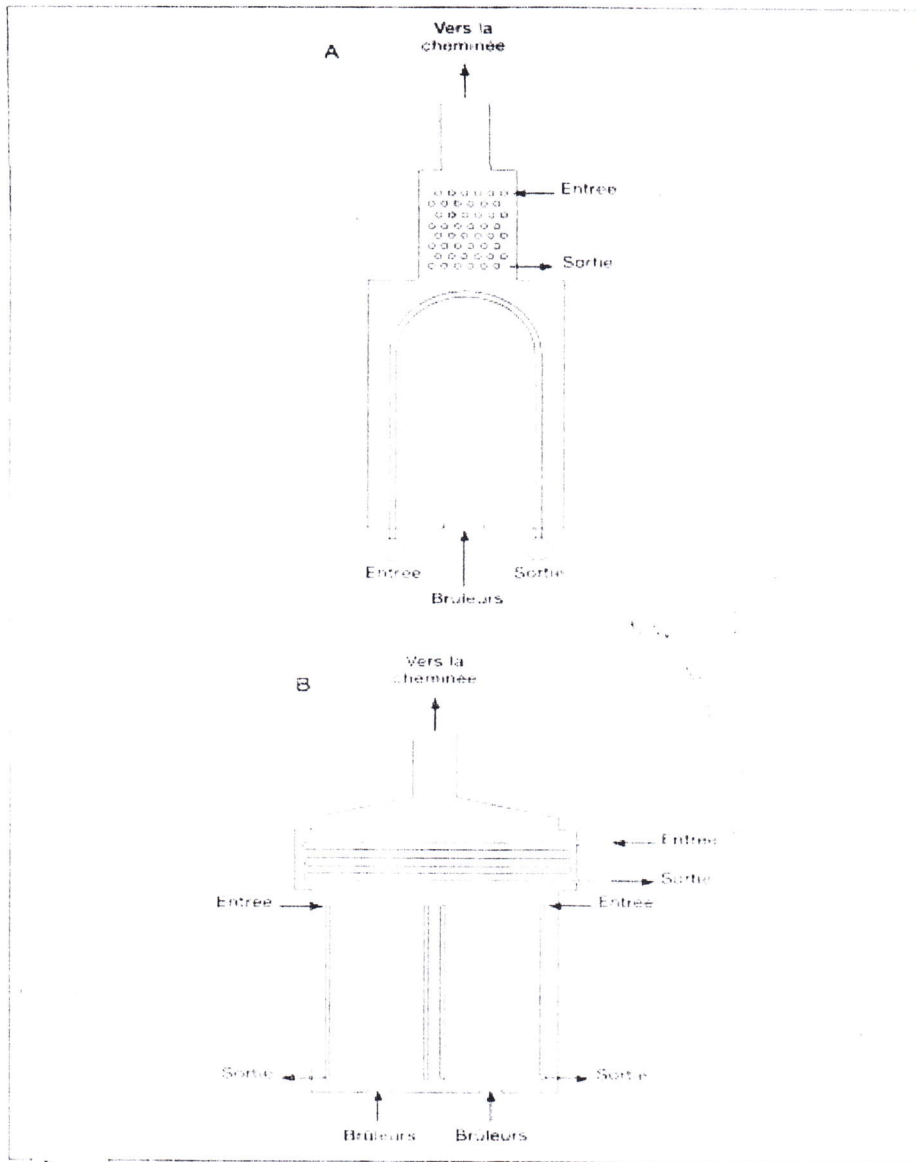
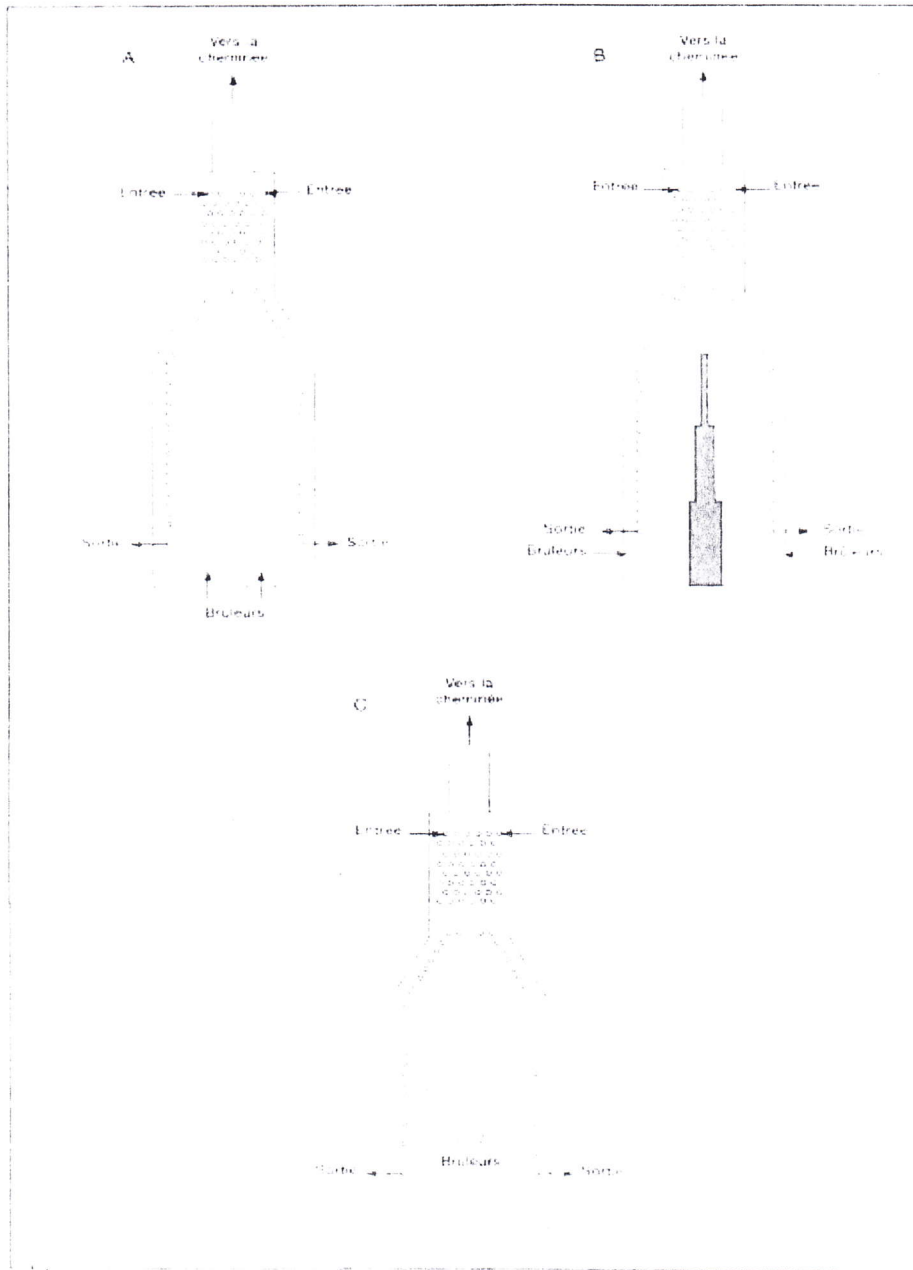


Figure III.1 : four cylindrique vertical



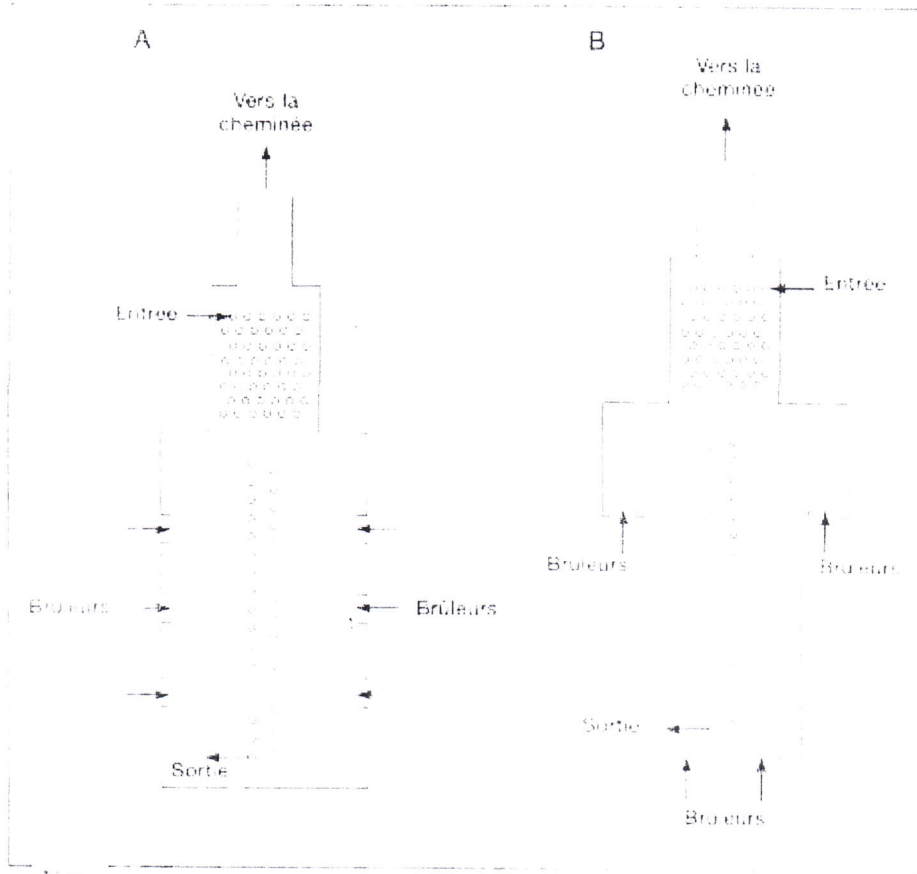
Figure

Figure III.2 : Les fours boites



Figure

Figure III.3 a : les fours cabines



Figure

Figure III.4 : Les fours à chauffage par murs radiants

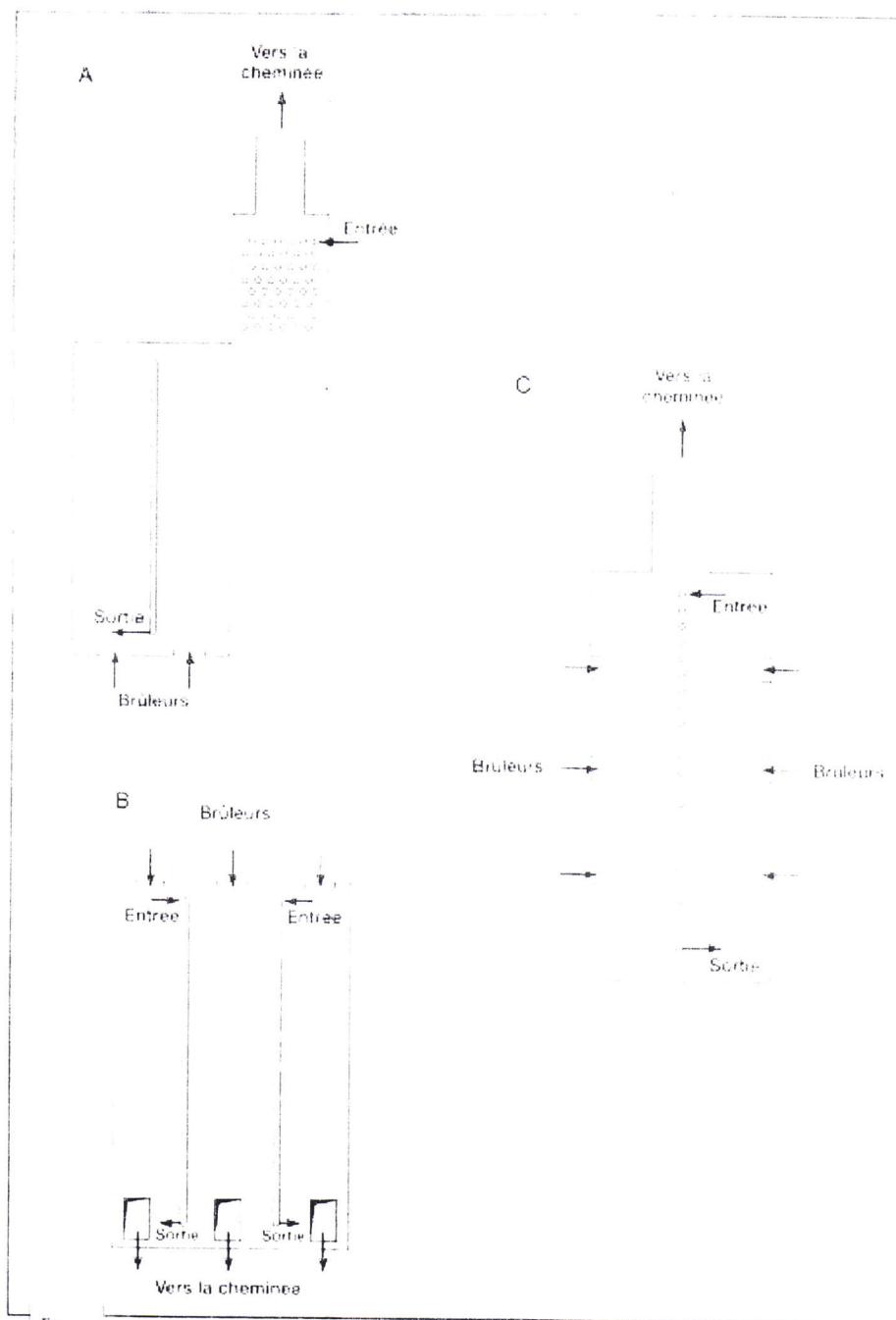
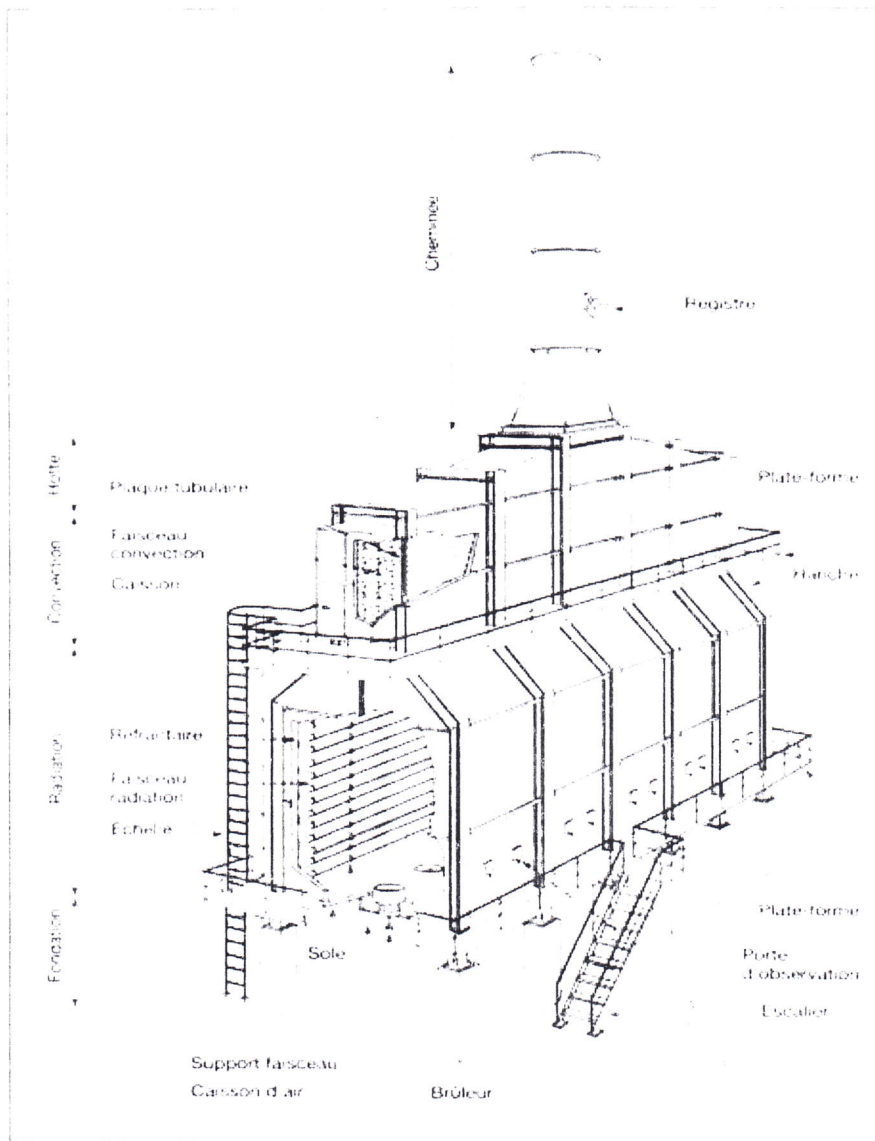


Figure III.5: les fours dits à double chauffe



Figure

Figure III.3 b : four cabine à tube horizontaux

III.5. le choix d'un type de four tubulaire :

Le choix dépend principalement des facteurs suivants :

- Nature du produit chauffe et conditions de service (débit, pression, température)
- Drainabilité des faisceaux tubulaires;
- Présence ou non de catalyseur dans les tubes ;
- Combustible;
- Encombrement;
- Facilité de construction ou de transport;
- Coût pour une application donnée.

III.6. Description générale des fours :

Un four tubulaire est constitué d'une enveloppe métallique de formes diverse, souvent parallélépipédique ou cylindrique.

Le four comporte une zone dite « **zone de radiation** » qui est celle où les tubes sont directement exposés à la flamme et reçoivent la chaleur par rayonnement de produit de combustion. C'est en général devant les parois de cette zone que sont placés les tubes, la plupart du temps en une rangée parfois en deux rangées.

La zone de convection si elle existe est installée à la sortie des fumées de la chambre de combustion. Elle est constituée d'un faisceau de tube placé en quinconce, perpendiculairement ou parallèlement à la direction des fumées. Dans les deux cas on cherche à obtenir une vitesse assez grande pour les fumées, de façon à augmenter le coefficient d'échange. Les tubes placés en zone de convection ont quelque fois leurs surfaces extérieures, dans la partie en contact avec les fumées recouverte d'ailettes ou d'aiguilles qui augmentent considérablement la surface d'échange. (fig-III-6) et (fig-III-7)

L'enveloppe métallique du four doit être suffisamment renforcée pour résister aux actions du vent et supporter l'ensemble du faisceau tubulaire.

Les parois intérieures du four, particulièrement celles de la chambre de combustion, sont protégées contre les effets de la température par un garnissage réfractaire isolant qui a pour but de réduire les pertes calorifiques à l'extérieur.

Le plancher de la zone de combustion constitue la sole du four ; elle est, elle aussi, recouverte d'une couche de produits réfractaires et isolants.

Les parois verticales sont percées d'orifices dans lesquels sont placés les brûleurs, un certain nombre de regards permettent d'observer la combustion, la forme des flammes, la

tenue des tubes ; des portes d'accès à l'intérieur du four sont aussi ménagées dans les parois. Ces regards et ces portes doivent être hermétiquement clos lorsque le four est en service. [8]

III.7. Caractéristiques générales des fours tubulaires :

Un four tubulaire est conçu et calculé pour permettre de transférer au fluide une quantité de chaleur donnée par heure, le débit et les températures d'entrée et de sortie étant fixes à l'avance. Il faut donc faire apparaître dans le four une quantité de chaleur suffisante à la température voulue, pour réchauffer le fluide et compenser les pertes, et transférer la chaleur disponible au fluide dans des conditions telles que celui-ci ne soit pas détérioré.

Le four doit donc être avant tout agencé en vue de la combustion d'une quantité suffisante de combustible.

Il devra comporter les brûleurs nécessaires ; ceux-ci devront pouvoir être alimentés en combustible en air.

Les températures obtenues dans les produits de la combustion sont toujours très élevées. On peut, d'ailleurs, les augmenter en préchauffant l'air de combustion par les fumées allant à la cheminée.

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 des 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.

Le phénomène le plus important à prendre en considération est la radiation des produits de la combustion. [8]

III.8. L'entretien des fours : [11]

L'entretien quotidien :

Il faut vérifier s'il y a :

- La courbure, le ployage, le gonflement, le chauffage local des tubes.
- Les fuites des tubes et des coudes.
- L'effondrement des briques réfractaires.
- Les fuites de gaz de combustion du mur du four.
- Les fuites de gaz tuyauterie autour des brûleurs.

L'entretien périodique :

Il faut vérifier s'il y a :

- la courbure, le ployage, le gonflement, la fissure des tubes
- la fissure et la courbure des supports et portes des tubes.
- la fissure, l'effondrement des briques réfractaires.
- L'avancement de la corrosion de la cheminée.

Et il faut effectuer :

L'essai de compression, l'essai étancheité, la mesure d'épaisseur des tubes.

III.9. avantage des fours modernes :

Les fours tubulaires qui sont venus prendre la relève possèdent par rapport aux autres les avantages suivants.

- 1- Les fours tubulaires reposent sur le principe de la vaporisation simple cela permet soit de vaporiser à température égale une plus grande quantité de charge soit d'opérer à une température plus basse est de réaliser ainsi une économie de combustible.
- 2- Ils possèdent une puissance de chauffe plus élevées étant donné que la chaleur est transmis par rayonnement et par les gaz de la combustion qui se meuvent à une vitesse linéaire élevée.
- 3- Ils possèdent un degré d'effet thermique plus élevé.
- 4- Ils permettent de réduire au minimum la durée de séjour de la charge dans la zone des hautes températures.
- 5- Ils sont faciles à conduire et à automatiser, ils demandent des frais de main d'œuvre moins élevée.

III.10. rendement d'un four : [8]

L'économie d'exploitation est un facteur prépondérant dans l'étude d'un four, aussi la notion de rendement est-elle d'importance.

On définit le rendement d'un four comme le rapport entre la quantité de chaleur absorbée par le fluide réchauffé et celle dégagée par la combustion.

Une partie, en général très faible, de la chaleur non absorbée est perdue par conduction à travers les parois du four .les pertes les plus importantes sont les pertes

à la cheminée, dissipées dans l'atmosphère par les fumées qui sortent du four à température encore assez élevée.

III.11. Pollutions et environnement : [7]

Consommateurs d'énergie, les fours ont, particulièrement par leurs rejets dans l'atmosphère, un impact non négligeable sur l'environnement.

Il faut noter que, par exemple, certains très gros fours de la chimie, de la sidérurgie ou de la cimenterie rejettent par leur cheminée des débits de fumées qui peuvent dépasser le million de tonnes par an.

Polluants :

Pour ce qui concerne les fours industriels les polluants les plus courants sont :

- **les oxydes de soufre** (SO_2 et SO_3) formés à partir du soufre contenu dans certains combustibles (fioul, gaz de cokerie, etc.) ;
- **les oxydes d'azote** (NO , NO_2 , N_2O) formés au cours de la combustion soit à partir des composés azotés 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 provenance des produits chauffés, entraînées par les fumées ;
- **l'oxyde de carbone** (CO) dans les fours où la combustion s'effectue avec un défaut d'air.

On peut trouver également, dans des installations plus spécifiques 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 entraîne.

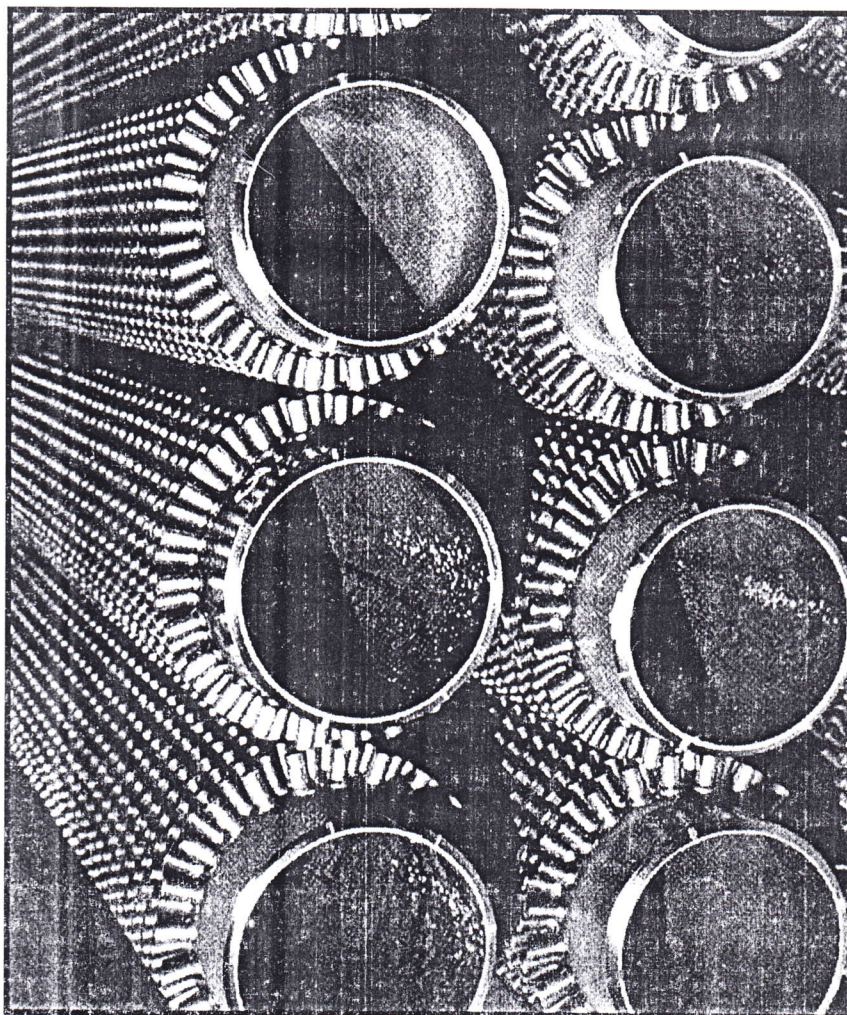


Fig. III.6 - tube avec picots

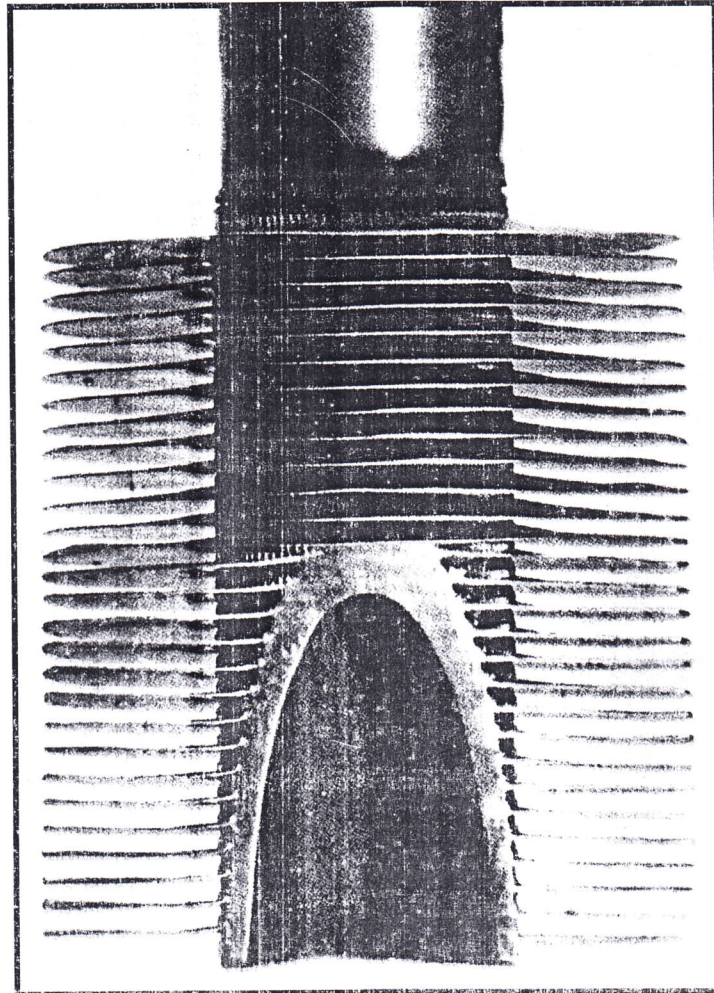


Fig.III.7 - tube avec ailettes radiales

Chapitre IV:

Calcul thermique du four

Introduction :

Chaque type de four a évidemment son processus de calcul propre, qui tient compte de sa technologie et de ses utilisations. On ne donnera donc ici que les principes de calcul communs à tous les fours.

IV.1. calcul thermique du four : [7]**IV.1.1 Bilans énergétiques :**

Quel que soit le four, l'objectif est de fournir aux produits une quantité de chaleur déterminée par :

- sa température initiale ou température d'enfournement ;
- la température finale désirée ou température de défournement ;
- la masse des produits à chauffer ;
- la chaleur massique des produits et, s'il a lieu, les chaleurs de transformation durant la montée en température.

Soit Q_u cette **quantité de chaleur utile**.

IV.1.2 Rendement énergétique :

Le **rendement** d'un four est le rapport de l'énergie utile Q_u à l'énergie Q_p qu'il faut fournir au four sous forme de combustible ou d'électricité.

En appelant Q_p les diverses pertes thermiques, il vient :

$$Q = Q_u + Q_p$$

$$\eta = \frac{Q_u}{Q} = \frac{Q - Q_p}{Q} \quad -1-$$

Le terme Q_p comprend :

- les pertes par les fumées Q_f ;
- les pertes par les parois Q_v ;
- l'énergie nécessaire au réchauffage des parois Q_{mv} ;
- les pertes par les ouvertures du four Q_e .

Il y a lieu de déterminer ces pertes pour calculer le rendement du four.

IV.1.3 Rendement de combustion :

Si l'on considère un combustible quelconque, il est caractérisé, entre autres, par :

- son pouvoir calorifique inférieur PCI ;
- le volume d'air nécessaire à sa combustion en stœchiométrie V_{ao} ;
- le volume de fumées produit par sa combustion en stœchiométrie V_{fo} ;

Dans les conditions usuelles d'utilisation dans les fours, la combustion se fait généralement

avec de l'air en excès (et plus rarement avec de l'air en défaut).

Si on appelle e l'excès d'air exprimé en pourcentage, les **volumes d'air utilisé et de fumées produites** lors de la combustion complète d'une unité de masse (pour les solides et les liquides) ou de volume (pour les gaz) de combustible s'écrivent :

$$V_a = V_{a0} \cdot \left(1 + \frac{e}{100}\right)$$

$$V_f = V_{f0} \cdot \left(V_{a0} \times \frac{e}{100}\right)$$

IV.1.3.1 pertes par les fumées

$$Q_f = V_f \cdot C_{pf} \cdot T_f$$

T_f : température de sortie de fumées du four ($^{\circ}\text{C}$).

C_{pf} : capacité thermique volumique moyenne à pression constante dans l'intervalle de température 0°C à T_f .

IV.1.3.2 La chaleur apportée par l'air s'écrit :

$$Q_a = V_a \cdot C_{pa} \cdot T_a$$

T_a : température de l'air à son entrée dans le four (en $^{\circ}\text{C}$),

C_{pa} : capacité thermique volumique à pression constante de l'air.

On appelle **rendement de combustion**, le rapport $\eta_c = \frac{PCI + Q_a - Q_f}{PCI}$ -2-

Si on considère le four et l'équipement éventuel de préchauffage de l'air à partir des fumées comme un seul système, et en considérant, dans ce cas, la température des fumées T_f à l'aval du réchauffeur d'air, la relation (2) devient :

$$\eta_c = \frac{PCI - Q_f}{PCI} \quad -3-$$

IV.1.4 Relation entre le rendement énergétique et le rendement de combustion :

Ramené à une unité de combustible, la relation (1) peut s'écrire :

$$\eta = \frac{PCI - Q_p}{PCI}$$

Ou
$$\eta = \frac{PCI - Q_f - (Q_v + Q_{mv} + Q_e)}{PCI}$$

et en introduisant donné par la relation (3) :

$$\eta = \eta_c - \frac{Q_v + Q_{mv} + Q_e}{PCI} \quad -4-$$

Dans un certain nombre d'installations, par exemple pour les fours continus à basse température, le terme :

$$\frac{Q_v + Q_{mv} + Q_e}{PCI}$$

est petit et, dans ce cas, il vient :

$$\eta = \eta_c$$

IV.1.5 Rendement des fours continus :

Dans un **four continu en régime thermiquement stabilisé**, les températures des fumées et de l'air de combustion sont constantes dans le temps et les parois sont en équilibre thermique, ce qui entraîne :

$$Q_{mv} = 0$$

Le calcul du rendement se fait, généralement, sur une base horaire, la chaleur utile Q_u et les pertes Q_v et Q_e seront déterminées sur une heure. On peut donc calculer facilement puis avec les formules (2) et (3).

Les fours continus étant assez peu souvent arrêtés et refroidis, l'énergie utilisée durant les périodes de mise en température est souvent négligeable dans le bilan global d'exploitation.

IV.1.6 Détermination des pertes par les parois :

Dans les **fours continus**, en régime thermique établi, on applique pour les parois planes (murs, voûte, sole) la relation :

$$Q_v = K (T_i - T_e) S$$

$$\text{avec } K = \frac{1}{\left(\sum \frac{e_i}{\lambda_i}\right) + \left(\frac{1}{k_e}\right)}$$

e_i : épaisseur des i couches successives de réfractaires ou d'isolants ;

λ_i : conductivité thermique des i couches successives de réfractaires ou d'isolants ;

K_e : coefficient d'échange de la paroi externe avec l'ambiance ;

T_i : température de la paroi interne du four ;

T_e : température externe ambiante ;

S : surface externe du four.

Dans les fours convenablement isolés, T_i est très proche de la température de l'ambiance du four

à l'endroit considéré. Le coefficient k_e regroupe :

– un facteur rayonnement qui croît avec la température de la

Paroi externe T_e ;

– un facteur convection qui croît avec la vitesse de circulation de l'air autour de la paroi externe.

IV.1.7 Calcul de la chaleur accumulée :

Calcul de l'énergie nécessaire au réchauffage des parois Q_{mv} demande la connaissance de la distribution de température dans les parois lorsque l'équilibre thermique est atteint, ainsi que celle des caractéristiques physiques, à la température considérée, des matériaux composants ces parois. Pour chacun des composants des parois, on a :

$$Q_{mvi} = M_i C_i (T_{fin} - T_{in})$$

M_i : masse du matériau considéré,

C_i : capacité thermique massique du matériau considéré,

T_{in} : température initiale du matériau,

T_{fin} : température finale du matériau

C_i : étant le plus souvent fonction de la température, on prendra la valeur moyenne entre T_{in} et T_{fin} .

Les températures T_{in} et T_{fin} variant dans l'épaisseur de la paroi, on prendra les valeurs moyennes entre les deux faces de la paroi.

On se souviendra que, pour les **fours continus**, l'importance de Q_{mv} dans le bilan global de l'installation est relativement faible.

IV.1.8 Puissance installée :

C'est la **quantité de chaleur maximale** que l'on peut introduire par unité de temps dans le four.

Dans un Fours continus la puissance installée sur l'ensemble du four est donnée par :

$$P = Q_U / \eta = (Q_u + Q_v + Q_c) / \eta_c$$

Avec η_c et η sont respectivement rendement de combustion et rendement du four.

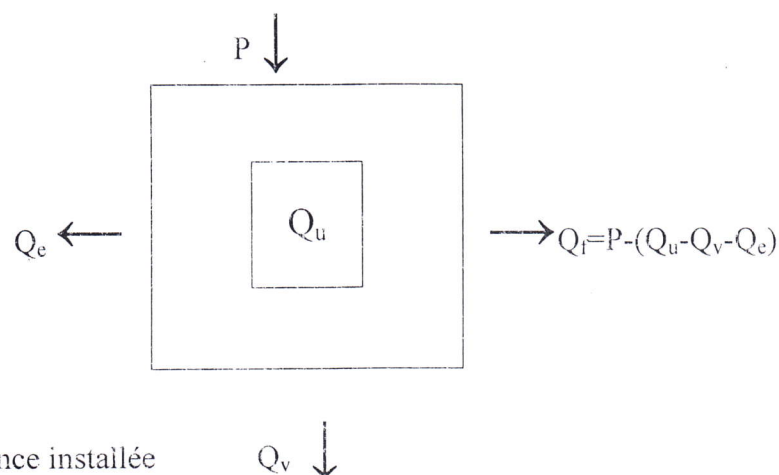


Fig IV : la puissance installée

IV.2. Dimensionnement des fours :

C'est le problème principal pour le concepteur et le constructeur.

Les calculs de dimensionnement sont, évidemment, spécifiques à chaque type de four. Fondamentalement, ces calculs consistent à résoudre simultanément tout ou partie des relations suivantes.

La **loi de Stefan-Boltzman** qui régit les échanges par **rayonnement** entre le four et la charge

$$Q = \int a \cdot \sigma \cdot S (T_f^4 - T_c^4) dt$$

La **loi de Newton** qui régit les échanges par **convection** entre le four et la charge:

$$Q_c = \int k \cdot S (T_f - T_c) dt$$

L'**équation de Fourier** qui régit les échanges par **conduction** à l'intérieur des produits :

$$\partial T / \partial t = (\lambda / C_p \cdot \rho) \nabla^2 T$$

Ils se font actuellement avec des programmes informatiques de calcul, par des méthodes numériques plus ou moins sophistiquées, et des simplifications adaptées à chaque type de four qui intègrent les données rappelées ci-dessous :

- Flux thermiques acceptables.
- temps de séjour nécessaire à l'égalisation des températures.
- chaleur utile.
- rendement de combustion.
- pertes diverses ...etc.

On détermine de cette façon le temps de séjour du produit dans le four et, en fonction de la production souhaitée, les dimensions du four.

Des approches simplifiées sont souvent utilisées par les praticiens .elle consistent à utiliser des données expérimentales ou des règles du pouce pour déterminer rapidement les temps de séjour nécessaires.

Chapitre V :

Partie calcul

Calcul du four :

Données de départ :(données de Haoud Berkaoui)**Tableau N°1 : Paramètres et conditions de service :**

Débit Kg/h	300 000 Kg/h
Température d'entrée °C	5
Température de sortie °C	43
% vaporisé	-
Rendement %	80
Excès d'aire	20
Température de l'air combustible °C	20
Humidité Relative	45

Tableau N°2 : Composition du gaz combustible :

Composant	Molaire (%)
N ₂	3,06
CO ₂	0,75
CH ₄	62,13
C ₂ H ₆	21,43
C ₃ H ₈	8,63
i-C ₄ H ₁₀	0,73
n-C ₄ H ₁₀	2,30
i-C ₅ H ₁₂	0,29
n-C ₅ H ₁₂	0,45
i-C ₆ H ₁₄	0,12
n-C ₆ H ₁₄	0,09
i-C ₇ H ₁₆	0,01
n-C ₇ H ₁₆	0,01
TOTALE	100

Tableau N° 3 : Les caractéristiques physico-chimiques du combustible :

PM (g/mole)	23.96
PCS (kcal / m ³)	12707
Densité	0.8286
ρ (Kg/m ³)	1.0155

Tableau N° 4 : Les caractéristiques physico-chimiques du brut :

Densité	0.8103
Poids moléculaire (g/mol)	213
Pouvoir calorifique S (Kcal/Kg)	11086

Les calculs effectués :

- Calcul de la combustion.
- Le bilan thermique du four.

Symboles utilisés pour le calcul du four :

NO_2 : quantité d'oxygène théorique (Kmol/Kmol_{gaz})

NO_{2p} : quantité d'oxygène pratique (Kmol/Kmol_{gaz})

N_{airth} : quantité d'air théorique (Kmol/Kmol_{gaz})

N_{airp} : quantité d'air pratique (Kmol/Kmol_{gaz})

N_{CO_2} : quantité de dioxyde de carbone dégagé (Kmol/Kmol_{gaz})

N_{H_2O} : quantité d'eau théorique (Kmol/Kmol_{gaz})

N_{H_2Oair} : quantité d'eau dans l'air (Kmol/Kmol_{gaz})

$N_{H_2Ototale}$: quantité d'eau totale (Kmol/Kmol_{gaz})

N_{N_2} : quantité d'azote dans l'air (Kmol/Kmol_{gaz})

$N_{N_2totale}$: quantité d'azote totale (Kmol/Kmol_{gaz})

M_f : la masse moléculaire des fumées (Kg/Kmol)

ρ_f : la masse volumique des fumées (Kg/m³)

V_f : volume des fumées (Nm³)

$M_{gaz\ comb}$: la masse moléculaire de gaz combustible (Kg/Kmol)

ρ_{com} : la masse volumique de combustible (Kg/m³)

ρ_{air} : la masse volumique de l'air (Kg/m³)

L_s : le débit d'air sec (Kg/Kg_{comb})

G_f : la quantité des fumées (Kg_{fumée}/Kg_{comb})

PCI : pouvoir calorifique inférieur (Kcal/m³)

- PCS** : pouvoir calorifique supérieur (Kcal/m^3)
- Q_{inf}** : pouvoir calorifique inférieur de 1Kg du combustible (Kcal/Kg)
- Q_{ab}** : la quantité de chaleur absorbée par la charge (Kcal/h)
- G** : le débit massique de la charge (Kg/h)
- $h_{43^\circ\text{c}}$** : l'enthalpie à la sortie de la phase liquide (Kcal/Kg)
- $h_{5^\circ\text{c}}$** : l'enthalpie à l'entrée de la phase liquide (Kcal/Kg)
- $H_{43^\circ\text{c}}$** : l'enthalpie de la phase vapeur (Kcal/Kg)
- e** : taux de vaporisation
- K** : facteur de caractérisation
- $Q_{\text{réel}}$** : le débit réel (Kcal/h)
- η** : le rendement
- B** : le débit de combustible (Kg/h)
- G_{ft}** : le débit des fumées (Kgl/h)
- N_{B}** : le nombre de bruleurs
- Q_{rad}** : la quantité de chaleur absorbée par radiation (Kcal/h)
- M** : coefficient de transfert direct
- V_{P}** : débit volumique de la charge (m^3/s)
- ρ_{P}** : la masse volumique de produit à 5°C (Kg/m^3)
- W** : la vitesse de la charge par passe (m/s)
- F_{ext}** : la surface extérieure d'un tube (m^2)
- F_{u}** : la surface utile d'un tube (m^2)
- N_{T}** : le nombre de tube dans la zone de radiation
- F_{Tu}^{R}** : surface des tubes dans la zone de radiation (m^2)
- N_{mi}** : nombre de tube sur le mur incliné
- l** : longueur de tube (m)
- S_{eq}** : surface équivalente de tube (m^2)
- T_{e}** : température d'entrée de fumée à la zone de convection ($^\circ\text{C}$)
- T_{s}** : température de sortie de brute de la zone de convection ($^\circ\text{C}$)
- T_1** : température d'entrée de brute de la zone de convection ($^\circ\text{C}$)
- T_2** : température de sortie de brute de la zone de convection ($^\circ\text{C}$)
- W_{f}** : vitesse massique des fumées ($\text{Kg/m}^3.\text{s}$)
- Q_{f}** : la masse volumique de fumée à T_{ch} (Kg/m^3)
- H_{ch}** : la hauteur de la cheminée (m)
- D** : diamètre de cheminée (m)

V.1. Calcul de la combustion :

Le calcul est basé sur l'équation stœchiométrique de la combustion des hydrocarbures ayant la formule généralisée C_nH_m , avec des excès d'air variant de 10% à 40% selon les équipements de chauffage. [12]

V.1.1. Réaction à combustion :



V.1.2. Quantité d'oxygène (O_2) nécessaire à la combustion :

D'après les réactions de combustion de fuel gaz

$$N_{O_2} = 2 \times (0,6213) + 7/2 \times (0,2143) + 5 \times (0,0863) + 13/2 \times (0,0073) + 13/2 \times (0,023 + 8 \times (0,0029) + 8 \times (0,0045) + 19/2 \times (0,0012) + 19/2 \times (0,0009) + 11 \times (0,0001) + 11 \times (0,0001) = 2,7024 \text{ Kmol} / \text{Kmol}_{\text{gaz}}$$

$$N_{O_2} = 2,7024 \text{ Kmol} / \text{Kmol}_{\text{gaz}}$$

La quantité pratique d'O₂ en tenant compte l'excès d'air ($\alpha=20\%$).

$$\text{Donc: } N_{O_2p} = N_{O_2} + (\alpha \times N_{O_2}) \rightarrow N_{O_2} = (1 + 0,2) \times 2,7024$$

$$N_{O_2p} = 3,2428 \text{ Kmol/Kmol}_{\text{gaz}}$$

V.1.3. La quantité d'air nécessaire à la combustion :

Comme la teneur de l'air en O₂ est 21%, alors la quantité d'air théorique :

$$N_{AIRth} = N_{O_2th} \times 100/21 \rightarrow N_{AIRth} = 2,7024 \times 100/21$$

$$N_{AIRth} = 12,8685 \text{ Kmol/Kmol}_{\text{gaz}}$$

La quantité pratique de l'air en tenant compte l'excès ($\alpha=20\%$) est :

$$N_{AIRp} = (1 + \alpha) \times N_{AIRth} \rightarrow N_{AIRp} = (1 + 0,2) \times 12,8685$$

$$N_{AIRp} = 15,4422 \text{ Kmol/Kmol}_{\text{gaz}}$$

V.1.4. Les quantités des produits de la combustion (Composition des fumées) :

- La quantité dioxyde de carbone (CO₂) dégagé :

$$N_{CO_2} = 0,6213 + 2 \times (0,2143) + 3 \times (0,0863) + 4 \times (0,0073) + 4 \times (0,023) + 5 \times (0,0029) + 5 \times (0,0045) + 6 \times (0,0012) + 6 \times (0,0009) + 7 \times (0,0001) + 7 \times (0,0001) = 1,4810 \text{ Kmol/Kmol}_{\text{gaz}}$$

$$N_{CO_2} = 1,4810 \text{ Kmol/Kmol}_{\text{gaz}}$$

- La quantité d'eau (H₂O) dégagé :

$$N_{H_2O} = 2 \times (0,6213) + 3 \times (0,2143) + 4 \times (0,0863) + 5 \times (0,0073) + 5 \times (0,023) + 6 \times (0,0029) + 6 \times (0,0045) + 7 \times (0,0012) + 7 \times (0,0009) + 8 \times (0,0001) + 8 \times (0,0001) = 2,4429 \text{ Kmol/Kmol}_{\text{gas}}$$

$$N_{H_2O} = 2,4429 \text{ Kmol/Kmol}_{\text{gaz}}$$

la quantité d'eau est alors :

$$N_{H_2O} = N_{Air} \times P_{H_2O} / (P - P_{H_2O}) \quad [3]$$

Avec :

P_{H_2O} : la pression partielle de l'eau (23,8 mm Hg)

P : la pression atmosphérique (760 mm Hg)

N_{H_2O} : La quantité de l'eau contenue dans l'air (Kmol).

$$N_{H_2O} = 15,4422 \times 23,8 / (760 - 23,8)$$

$$N_{H_2O} = 0,4992 \text{Kmol/Kmol}_{\text{gaz}}$$

➤ La quantité d'eau totale :

$$N_{H_2O} = 2,4429 + 0,4992$$

$$N_{H_2O \text{ Totale}} = 2,9421 \text{Kmol/Kmol}_{\text{gaz}}$$

➤ La quantité d'azote (N_2) dans l'air :

$$N_{N_2} = 0,79 \times (15,4422)$$

$$N_{N_2} = 12,1993 \text{Kmol/Kmol}_{\text{gaz}}$$

➤ quantité d'azote totale : $N_{N_2 \text{ Totale}} = N_{N_2 \text{ air}} + N_{N_2 \text{ gaz}}$

$$N_{N_2 \text{ Totale}} = 12,1993 + 0,0306$$

$$N_{N_2 \text{ Totale}} = 12,2299 \text{Kmol/Kmol}_{\text{gaz}}$$

V.1.5.les Caractéristiques des fumées :(tableau N°5)

Composant	PM (Kg/Kmol)	Quantité (Kmol)	% Vol	% Mol	$M_i \cdot X_i$
CO ₂	44	1,4810	8,6137	8,6137	3,7900
H ₂ O	18	2,9421	17,1117	17,1117	3,0801
N ₂	28	12,2299	71,1313	71,1313	19,9167
O ₂	32	0,5404	3,1430	3,1430	1,0057
Total		17,1934	100	100	27,7925

Table N°6 : composition des fumées (base : 100 Nm³ de gaz combustible) [8]

Composition de combustible	Mol (%)	O ₂ pour la combustion	Composition des fumées				Composition de combustible
			CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	
N ₂	3,06	...	...	...	...	...	N ₂
CO ₂	0,75	...	0,75	...	...	...	CO ₂
CH ₄	62,13	124,260	62,13	124,26	...	...	CH ₄
C ₂ H ₆	21,43	75,005	42,86	64,29	...	...	C ₂ H ₆
C ₃ H ₈	8,63	43,15	25,89	34,52	...	...	C ₃ H ₈
i-C ₄ H ₁₀	0,73	4,745	2,92	3,65	...	...	i-C ₄ H ₁₀
n-C ₄ H ₁₀	2,30	14,95	9,2	11,5	...	...	n-C ₄ H ₁₀
i-C ₅ H ₁₂	0,29	2,32	1,45	1,74	...	...	i-C ₅ H ₁₂
n-C ₅ H ₁₂	0,45	3,6	2,25	2,7	...	...	n-C ₅ H ₁₂
i-C ₆ H ₁₄	0,12	1,14	0,72	0,84	...	...	i-C ₆ H ₁₄
n-C ₆ H ₁₄	0,09	0,855	0,54	0,63	...	...	n-C ₆ H ₁₄
i-C ₇ H ₁₆	0,01	0,11	0,07	0,08	...	...	i-C ₇ H ₁₆
n-C ₇ H ₁₆	0,01	0,11	0,07	0,08	...	...	n-C ₇ H ₁₆
Total	100	266,645	148,85	244,29	54,048	1219,93	Air de combustion
O₂ dans excès d'air (20%)		54,048	148,10	294,21	54,048	1222,99	Total
O₂ combustible		324,28	8,6137	17,1117	3,1430	71,1313	Mol (%)
N₂ air		1219,93	1719,34				N^{bre} total de la fumée (volume des fumées)
N^{bre} de Kmol d'air de combustion pour 100 moles de gaz combustible		1544,22					

V.1.6. Calcul les spécifications des fumées et de gaz combustible :

1- La masse moléculaire des fumées :

$$M_f = \sum_i^4 M_i X_i \rightarrow M_f = 27,7925$$

$$M_f = 27,7925 \text{ Kg/Kmol}$$

2- La masse volumique des fumées aux conditions normales :

$$\rho_f = \frac{M_f}{22,4} \rightarrow \rho_f = 27,7925/22,4 \rightarrow$$

$$\rho_f = 1,2407 \text{ Kg/m}^3$$

3- Volume des fumées formées par la combustion de 1Nm³ de fuel gaz :

$$V_f = 1719,34/100 \rightarrow$$

$$V_f = 17,1934 \text{ Nm}^3$$

4- La masse moléculaire de gaz combustible : $M_{\text{gaz comb}} = \Sigma (M_i \cdot Y_i)$

$$M_{\text{gaz comb}} = 23,96 \text{ Kg/Kmol}$$

$$M_{\text{gaz comb}} = 23,96 \text{ Kg/Kmol}$$

5- La masse volumique de combustible aux conditions normales :

$$\rho_{\text{com}} = \frac{M_{\text{com}}}{22,4} \rightarrow \rho_{\text{com}} = 23,96/22,4$$

$$\rho_{\text{com}} = 1,0696 \text{ Kg/m}^3$$

6- La masse volumique de l'air :

$$\rho_{\text{air}} = 1,293 \text{ Kg/m}^3$$

7- Le débit d'air sec pour un 1 Kg de combustible :

$$L_s = 1,293 \cdot (N_{\text{Air}}/\rho_{\text{com}})$$

$$\rightarrow L_s = 1,293 \cdot (15,4422/1,0696)$$

$$L_s = 18,66 \text{ Kg/Kg comb}$$

8-La quantité des fumées rapportée à 1Kg de gaz :

$$G_f = V_f \cdot (\rho_f / \rho_{comb}) \rightarrow G_f = 17.1934. (1,2407 / 1,0696)$$

$$G_f = 19.93 \text{ Kg fumée s / Kg comb}$$

V.1.7. Pouvoir calorifique du combustible :

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

$$PCI = PCS - 10,9.N \quad (\text{pour un gaz}). [8]$$

Avec : N : nombre de moles de H₂O.

- Détermination du nombre de moles de l'eau :

$$\begin{array}{l} 1 \text{ mol de gaz} \longrightarrow 2,9421 \text{ moles de H}_2\text{O.} \\ 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \longrightarrow 2,9421 \text{ moles de H}_2\text{O.} \\ 1 \text{ Nm}^3 \text{ de gaz} \longrightarrow N \end{array}$$

Donc :

$$N = 131,34 \text{ moles de H}_2\text{O}$$

- Le pouvoir calorifique supérieur du combustible : PCS=12707Kcal/m³ (tableau N.3)

$$\text{Donc : } PCI = 12707 - 10,9 \times 131,34$$

$$PCI = 11275,394 \text{ Kcal/Nm}^3$$

- Pouvoir calorifique inférieur de 1Kg du combustible :

$$Q_{inf} = PCI / \rho_{comb} \rightarrow Q_{inf} = 11275,394 / 1,0696$$

$$Q_{inf} = 10541,692 \text{ Kcal/Kg}$$

V.2. Bilan thermique:

- Pour faire les calculs on va choisir un four tubulaire (cabine) fig(III.3).
- La quantité de chaleur absorbée par la charge :

$$Q_{ab} = G[(h_{43^\circ\text{C}} - h_{5^\circ\text{C}}) + e.(H_{43^\circ\text{C}} - h_{43^\circ\text{C}})] \quad [12]$$

Les enthalpies des phases liquides et vapeurs sont déterminées d'après la Fig. (1)

(voir les annexes)

$$\text{Pour : } h_{5^\circ\text{C}} = 4 \times 1 = 4 \text{ Kcal/Kg}$$

$$\text{Pour : } h_{43^\circ\text{C}} = 19 \times 1 = 19 \text{ Kcal/Kg}$$

Pour : $H_{43^{\circ}\text{C}} = 96 - 5 = 91 \text{ Kcal/Kg}$

1 est un facteur de correction dans la phase liquide.

5 est un facteur de correction dans la phase vapeur pour $k=12$. fig(V.1) [1]

Détermination de taux de vaporisation :

L'enthalpie a la sortie du four est :

$$h = C_p \cdot \Delta T = 0,462 \cdot 38,8 = 17,92 \text{ Kcal/Kg}$$

$$\text{On a : } e = (h_{43^{\circ}\text{C}} + h_{5^{\circ}\text{C}}) - h / (h_{43^{\circ}\text{C}} - h)$$

Donc :

→

$$e = 6,4 \%$$

$$Q_{ab} = 300000 \cdot [(19 - 4) + 0,064 \cdot (91 - 19)]$$

$$Q_{ab} = 5882400 \text{ Kcal/h}$$

• Le débit réel :

$$Q_{\text{réel}} = Q_{\text{abs}} / \eta = 5882400 / 0,8$$

$$Q_{\text{réel}} = 7353000 \text{ Kcal/h}$$

• Le débit de combustible : [4]

$$B = Q_{\text{réel}} / Q_{\text{inf}} \rightarrow B = 7353000 / 10541,69$$

$$B = 697,51 \text{ Kg/h}$$

• Le débit de fumées :

$$G_{\text{ft}} = B \cdot G_f$$

Donc

$$G_{\text{ft}} = 13901,37 \text{ kg/h}$$

• Le nombre de brûleurs :

On générale le débit d'un brûleur varie entre 150 à 180 Kg/h [12]

$$\text{Donc : } N_B = 697,51 / 180$$

$$N_B = 4 \text{ brûleurs}$$

V.3. Calcul de la zone de radiation :

D'après les données pratiques les fractions de chaleur utiles absorbées par les tubes de radiation constitue 65 à 75 de Q_{ab} .

Admettant que 70% de la chaleur utile est absorbées par radiation : [12]

$$Q_{rad} = 0,7 \cdot Q_{ab} = 0,7 \cdot 5882400 = 4117680 \text{ Kcal/h}$$

Dans ce cas le coefficient de transfert directe est égale à :

$$M = Q_{rad} / Q_{rel} = 0,56$$

Par la suite il est nécessaire de connaître la température moyenne des produits dans la zone de radiation.

La température de passage du produit de la zone de convection à la zone de radiation pour la valeur admise de Q_{rad} est déterminée d'après la variation de l'enthalpie du pétrole.

La variation de 1 Kg de produit dans la zone de radiation est :

$$Q_G^{rad} = \frac{4117680}{300000} = 13.72 \text{ Kcal/Kg}$$

L'enthalpie de 1Kg du produit à la sortie du four :

$$H_5 = h_{43} + e \cdot (H_{43} - h_{43}) = 19 + 0,064 (91 - 19) = 23,6 \text{ Kcal/Kg}$$

L'enthalpie de 1Kg du produit à la sortie de la zone de convection :

$$H_{sconv} = H_5 - (Q_{rad}/G) = 9,88 \text{ Kcal/Kg}$$

La température correspondante à cette enthalpie est de 21°C :

D'après le fig(V.1)

La température moyenne dans la zone de radiation est alors

$$t_m = \left(\frac{21 + 43}{2} \right) = 32^\circ\text{C}$$

En générale la température moyenne de la paroi des tubes de la zone de radiation est de 40 à 45°C plus grande que celle des fluides circulant dans les tubes. [12]

$$t_m = 32 + 40 = 72^\circ\text{C}$$

La surface des tubes de la zone de radiation :

$$F_{ras} = \frac{Q_{ras}}{q_{rad}}$$

Avec : q_{rad} : Taux de transfert de la chaleur pour les tubes de la zone de radiation.

On admet que : d'après le tableau N°=7 (voir les annexes)

$$q_{rad} = 50000 \frac{Kcal}{h m^2}$$

Donc :

$$F_{rad} = \frac{4117680}{50000} = 82,3m^2$$

Débit volumique de la charge à l'entrée du four :

Donc :

$$V_p = \frac{G}{P_p} = \frac{300000}{3600.810} = 0.1029 \frac{m^3}{S}$$

La vitesse de la charge par passe (on admet que le nombre de passe h=4) [12]

$$W = \frac{V_p}{\frac{h\pi(D_m)^2}{4}}$$

On choisit les tubes ayant les caractéristiques suivantes : [12]

$$D_{ext}=0.128 m$$

$$D_{int}=0.116m$$

Entre-axe (C=0.215)

Donc :

$$W = \frac{0.1029}{4 \times 3.14 \times (0.116)^2} = 2.435 \frac{m}{S}$$

On a des tubes d'une longueur de 5.5 m alors la surface extérieur d'un mètre de tubes sera :

$$F_{ext} = \pi D_{ext} = 3,14 \times 0,128 = 0,402 \frac{m^2}{m \text{ de tubes}}$$

La surface utile d'un tube :

$$F_{ut} = F_{ext} \ell = 0,402 \times 5,5 = 2,211 m^2$$

Longueur utile totale de la zone de radiation :

$$L_{ur} = \frac{F_{rad}}{F_{ext}} = \frac{82,3}{0,402} = 204,8m$$

Dans ce cas le nombre de tubes dans la zone de radiation sera :

$$N_T = \frac{F_{rad}}{F_u} = \frac{82,3}{2,211} = 38$$

Surface des tubes dans la zone de radiation :

$$F_{Tu}^R = F_u \times N_T = 2,211 \times 38 = 84,01 \text{ m}^2$$

Taux de transfert en radiation

$$q_{rad} = \frac{4117680}{84,01} = 49020 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \text{ h}}$$

On a admet que la largeur est $L_{four} = 3 \text{ m}$ [12]

On fixe 4 tube dans la rangé de protection : [8]

Donc la largeur de la zone de convection est :

$$L_{cov} = (1 + 4)C = 5 \times 0,215 = 1,075 \text{ m}$$

La longueur du mur incliné avec $\alpha = 30^\circ$ est : [8]

$$l_{inc} = \frac{L_f - l_{conv}}{2 \cdot \cos 30} = \frac{3 - 1,075}{2 \cdot 0,866} = 1,11 \text{ m}$$

Nombre de tubes sur les murs inclinés :

$$N_{inc} = 2 \cdot \frac{l_{inc}}{C} = 10,00$$

Donc 5 tubes sur chaque mur incliné.

Nombre de tubes sur les murs verticaux :

$$N_{mv} = 38 - (4 + 10) = 24 \text{ tubes}$$

C'est-à-dire 12 tubes sur chacun des murs verticaux

La hauteur du mur vertical est de : $h_v = 12 \times 0,215 = 2,85 \text{ m}$

La hauteur du four jusqu'à la zone de convection est de :

$$h_{rad} = h_v + h_{inc} = 2,85 + 1,1 \cdot \sin 30 = 3,4 \text{ m}$$

Volume de la chambre de combustion :

$$V = [L_f \cdot h_v + (L_f + l_{con}) \times 0,5 \times l_{inc} \cdot \sin 30] \times l_{tube} = [3 \times 2,85 + (3 + 1,075) \times 0,5 \times 0,555] \times 5,5$$

$$V = 53,24 \text{ m}^3$$

Taux de transfert de chaleur de combustion :

$$\tau = \frac{Q_{reel}}{V_{cc}} = \frac{7353000}{53,24} = 138110,44 \frac{Kcal}{hm^3}$$

$$\tau = 138110,44 \frac{Kcal}{hm^3}$$

Le calcul de la surface équivalente des tubes [8]

$$\frac{C}{D_{ext}} = \frac{0,215}{0,128} = 1,67$$

La surface de plan d'absorption A

- Pour tubes de protection : $A' = 4 \times C \times l_{tube} = 4 \times 0,215 \times 5,5 = 4,73 m^2$
- Pour les tubes latéraux : $A'' = (N_t - 4) \times C \times l_{tube} = (38 - 4) \times 0,215 \times 5,5 = 40,20 m^2$
- Facteur de forme pour tubes de protection est $K' = 0,99$
- Facteur de forme pour tubes latéraux $K'' = 0,93$ d'après la fig(V.2)

$$S_{eq} = k.A = k'.A' + K''.A'' = 0,99 \times 4,73 + 0,93 \times 40,30 = 42,16 m^2$$

Longueur total des murs sur les quelles sont montes les tubes

$$L_{mur} = (N_t - 4) \cdot C = (38 - 4) \cdot 0,215 = 7,31 m$$

Calcul du produit : [8]

Le four choisie : 2.92, 3, 5.5 correspond aux rapports : 1 ; 1,02 ; 1,88

D'après le tableau-8- : (voir les annexes)

Donc l'épaisseur utile de rayonnement.

$$l = \frac{2}{3} \sqrt[3]{V_{cc}} = \frac{2}{3} \sqrt[3]{53,24} = 2,50 m$$

La pression partielle de H₂O et de CO₂ :

$$P_i = P_{H_2O} + P_{CO_2} = 0,0853 + 0,1613 = 0,2466 atm \quad (8)$$

$$\text{Le produit } P_i \cdot l = 0,2466 \times 2,50 = 0,61 atm \cdot m$$

Température de peau des tubes:

Nous l'estimation à 25°C au dessus de la température du fluide à la sortie :

$$T_{s,t} = 43 + 25 = 68°C \quad [8]$$

Calcul de la fraction de chaleur libérée par la combustion : qui est absorbée par radiation (coefficient de transfert direct) donne :

$$M = \frac{1}{1 + \frac{L_s \cdot \sqrt{\frac{Q_{reel}}{KA}}}{6940}} = \frac{1}{1 + \frac{18,66 \sqrt{\frac{7353000}{42,16}}}{6940}} = 0,47$$

Donc on a 0,47 au lieu de 0,56

Le facteur global d'échange :

Les pertes [8]

Les pertes par les parois en zone de radiation 1%.

Les pertes par la zone de convection à 0.5 %.

Les pertes par la cheminée 18.5 %.

La température de fumée à la sortie de la zone de convection :

Pertes par la cheminée est 18.5 % donc d'après la figure(V.5) (voir les annexes)

$$T_s = 385 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La température de fumée à l'entrée de la zone de convection :

On a les pertes dans la zone de radiation sont 1 %.

$$(100 - M - 1) = (100 - 47 - 1) = 52 \text{ \% d'après la figure (V.5) (voir les annexes)}$$

$$T_e = 955 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Donc la température de gaz dans la zone de radiation est $T_g = 955 + 20 = 975 \text{ } ^\circ\text{C}$ d'après [4]

Et d'après la fig(V.3) le facteur d'émission de la flamme et $\varepsilon_f = 0.48$ (voir les annexes)

La surface totale intérieure de la zone de radiation [8]

$$\text{pignons : } 2(L_f \times h_v) + 2(L_f + l_{\text{conv}}) \cdot h_{\text{inc}}/2 = 2(3 \cdot 2,85) + 2,26 = 19,36 \text{ m}^2$$

$$\text{Mur : } (h_v + l_{\text{inc}}) \cdot l \cdot 2 = (2,85 + 1,1)2 \cdot 5,5 = 43,45 \text{ m}^2$$

$$\text{Sol : } L_f \cdot l = 3 \cdot 5,5 = 16,5 \text{ m}^2$$

$$\text{Donc } A_r = 79,31 \text{ m}^2$$

La surface équivalente des tubes situés devant les réfractaires :

$$S_{\text{eqr}} = K'' \times A'' = 0,93 \times 40,30 = 37,47 \text{ m}^2$$

$$\text{Surface des réfractaires : } A_r = A_t - S_{\text{eqr}} = 79,31 - 37,47 = 41,84 \text{ m}^2$$

D'après la figure (V.4) (voir les annexes) le facteur global d'échange est :

$$\varphi = f\left(\varepsilon_f, \frac{A_r}{K \cdot A}\right) = f(0,48, 0,99)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{A_r}{K \cdot A} = \text{rapport de la surface totale à la surface équivalente des tubes} \\ \frac{A_r}{K \cdot A} = \frac{41,84}{42,16} = 0,99 \text{ donc } \varphi = 0,6 \text{ : facteur global d'échange} \end{array} \right.$$

V.4. calcul de la zone de convection :

La chaleur à transmettre en convection est

$$Q_{\text{conv}} = Q_{\text{ab}} - Q_{\text{rad}} = 5882400 - 4117680 = 1764720 \text{ Kcal/h}$$

La température de fumée à la sortie de la zone de convection :

$$T_s = 385 \text{ °C}$$

La température de fumée à l'entrée de la zone de convection :

$$T_e = 955 \text{ °C}$$

La différence de température logarithmique moyenne est donnée :

$$DT_m = \frac{(DT_1 - DT_2)}{2.3 \log\left(\frac{DT_1}{DT_2}\right)}$$

La différence de température à chaque extrémité de la zone de convection est

$$DT_1 = T_e - T_2 = 955 - 21 = 934 \text{ °C}$$

$$DT_2 = T_s - T_1 = 385 - 5 = 380 \text{ °C}$$

$$\frac{DT_1}{DT_2} = 2.45$$

$$DT_m = 618.24 \text{ °C}$$

La température moyenne du produit est :

$$T_{\text{mprod}} = (T_1 + T_2) \cdot 0,5 = (5 + 21) \cdot 0,5 = 13 \text{ °C}$$

La température moyenne du film gazeux : [12]

$$T_{\text{mfi}} = T_{\text{mprod}} + \frac{DT_m}{2} = 322.12 \text{ °C}$$

Largeur de la zone de convection :

$$\text{Si on a 4 tubes une } \dots \dots \dots : L_{\text{conv}} = (4+1) \cdot C = (4+1) \cdot 0.215 = 1.075 \text{ m}$$

- Section de la zone de convection : $S_{\text{conv}} = L_{\text{conv}} \cdot l_{\text{tube}} = 1.075 \times 5.5 = 5.91 \text{ m}^2$
- Surface occupée par les tubes : $S_{\text{tube}} = 4 \cdot D_{\text{ex}} \cdot l_{\text{tube}} = 4 \times 0.128 \times 5.5 = 2.816 \text{ m}^2$
- Surface de passage : $S_p = S_{\text{conv}} - S_{\text{tube}} = 5.91 - 2.816 = 3.1 \text{ m}^2$

Vitesse massique des fumées

$$W_f = \frac{Gft}{Sp} = \frac{13901.37}{3.1} = 1.21 \frac{Kg}{m^2S}$$

Le calcul du coefficient de convection : [8]

$$\alpha_{conv} = \frac{0.015Cp \left(W_f^{2/3} \cdot T_{moyf}^{0.3} \right)}{D_{ext}^{1/3}} \frac{Kcal}{m^2h^{\circ}C}$$

Où

W_f : Vitesse massique des fumées $\frac{Kg}{m^2h}$

T_{moyf} : Température moyenne des fumées °K

Cp : Chaleur spécifique moyenne des fumées ; $\frac{Kcal}{Kg^{\circ}C}$

D_{ext} : Diamètre extérieur du tube (m)

$$T_{moyf} = (T_e - T_s).0,5 = (955+385).0,5 = 670 \text{ }^{\circ}C$$

$$Cp = 0.258 + 4.5 \times 10^{-5} T_{moyf}$$

$$= 0.258 + 4.5 \times 10^{-5} \times 670 = 0.288 \frac{Kcal}{Kg^{\circ}C}$$

$$\alpha_{conv} = 21.51 \frac{Kcal}{m^2h^{\circ}C}$$

Le calcul du coefficient de radiation des gaz [8]

$$\alpha_R = 0.022 \times T_{moyf} - 2 = 12.74 \frac{Kcal}{m^2h^{\circ}C}$$

Le calcul du coefficient de radiation des murs : [8]

On peut utiliser la formule suivante (formule de Monard)

$$\alpha_m = 0,175 \cdot \varepsilon (T_{tm}/100)^3 \text{ (Kcal/h.m}^2\text{.K)}$$

Où T_{tm} : la température moyenne des parois du tube, nous l'estimerons à 50°C plus grande que celle du fluide.

ε : facteur d'émission des murs =0,95

$$T_{tm} = T_{mprod} + 50 + 273 = 13 + 50 + 273 = 336 \text{ K}$$

$$\alpha_m = 0,175 \cdot \varepsilon (336/100)^3 = 7,02 \text{ Kcal/h.m}^2\text{.K}$$

L'entraxe de deux rangées dans la zone de convection est égale à : [12]

$$C_2 = 0.5 \times C(3)^{1/2} = 0,5 \cdot 0,215 \cdot 1,732 = 0.186m$$

Surface du mur pour une rangée :

$$A_{mur}^I = 2 \cdot C_2 \cdot l = 2 \times 0.186 \times 5.5 = 2.046m^2$$

Surface extérieur du tube dans une rangée :

Nombre de tubes dans une rangée : n=4

$$A_T^I = 4 \cdot D_{ext} \cdot l = 4 \cdot 0,186 \cdot 5,5 = 4,092 m^2$$

L'effet de la radiation du mure est donnée par : [8]

$$E = \frac{\alpha_m}{\alpha_{conv} + \alpha_R + \alpha_m} \cdot \frac{A_{mur}^I}{A_{tube}^I}$$

$$= \frac{7.02}{21.51 + 12.74 + 7.02} \times \frac{2.046}{8.84}$$

$$E = 0.04$$

Le coefficient global du film (coté fumée) : [8]

$$\alpha_{conv}^I = (1 + E)(\alpha_{conv} + \alpha_m) = (1 + 0.04) \cdot (21,51 + 7,02)$$

$$\alpha_{conv}^I = 29,67 \frac{Kcal}{m^2 hk}$$

Le coefficient de transfert (coté fluide) est en général plus grand que α_{conv}^I et sa valeur varie de

$$480 \text{ à } 490 \frac{Kcal}{m^2 h^\circ C} \cdot [8]$$

Nous l'admettant égale à $480 \frac{Kcal}{m^2 h^\circ C}$. Alors le coefficient global de transfert de chaleur dans

la zone de convection :

$$K_{conv} = \frac{\alpha_{conv}^I \cdot 480}{\alpha_{conv}^I + 480} = \frac{29,67 \times 480}{29,67 + 480} = 27,94m^2$$

La surface nécessaire du tube dans la zone de convection [8]

$$F_{conv} = \frac{Q_{conv}}{K_{conv} \times DT_m} = \frac{1764720}{27,94 \cdot 618,24} = 102,16m^2$$

$$F_{conv} = 102,16 m^2$$

Le nombre de tube dans la zone de convection :

$$N_{conv} = \frac{F_{conv}}{\pi \cdot D_{ext} \cdot l} = \frac{102,16}{2.21} = 48tubes$$

La surface totale des tubes :

$$S_T = N_{conv} \cdot F_u = 48 \cdot 2,21 = 106,08m^2$$

Taux de transfert en convection :

$$q_{conv} = K_{conv}DT_m = 27.94 \times 618.24 = 17273.62 \frac{Kcal}{m^2h}$$

Le nombre de tube dans le four total

$$N_{rad} + N_{conv} = 38 + 48 = 86 \text{ tubes}$$

Le nombre de rangée

$$n_{rangée} = \frac{48}{4} = 12 \text{ rangées}$$

Hauteur de la zone de convection

$$h_{conv} = C_2(n_{rangée} + 1) = 13 \times 0.186 = 2.42 \text{ m}$$

la hauteur totale de four :

$$h_T = h_{conv} + h_{rad} = 2.42 + 3.4 = 5.82 \text{ m}$$

V.5 calcul de la cheminée : [12]

[La perte de charge] la pression dynamique est donnée :

$$P = \text{pression dynamique} = 5,1 \cdot 10^{-5} \cdot (W_f^2 / \varphi) \text{ (mmH}_2\text{O)}$$

Perte de charge dûe au passage des fumées dans la cheminée

$$DP_{ch} = \left(3,5 + \frac{H_{ch}}{50D} \right) P_{dyn}$$

La température de la cheminée : $t_{ch} = 385 - 60 = 325^\circ\text{C}$

La masse volumique des fumées à $t=325^\circ\text{C}$

$$\varphi_f^{325} = 1.245 \frac{273}{273 + 325} = 0.56 \frac{Kg}{m^3}$$

Perte de charge dans les volets d'air des brûleurs :

La valeur des pertes est généralement entre 9-8 mmH₂O

On la prend =8 mmH₂O [12]

La masse volumique dans la chambre de combustion à 955°C

$$\varphi_f^{955} = 1.245 \frac{273}{273 + 955} = 0.27 \frac{Kg}{m^3}$$

La masse volumique de l'air à 20°C

$$\varphi_{air}^{20} = 1.245 \frac{273}{273 + 20} = 1.16 \frac{Kg}{m^3}$$

Tirage supplémentaire par 10 m de la hauteur de chambre de combustion

$$h_{ts} = 10(\varphi_{air}^{20} - \varphi_f^{955}) = 10(1,16 - 0,27) = 8,9 \text{ mmH}_2\text{O}$$

On a la distance entre les brûleurs et les tubes de protection égale à 3.4 m

$$P_{TS} = \frac{h_{ts} \times 3.4}{10} = (8,9.3,4)/10 = 3\text{mmH}_2\text{O}$$

Au niveau des tubes de protection le tirage doit être égal à $DP_{tp} = 8-3=5 \text{ mmH}_2\text{O}$

$$\varphi_f^{670} = 1.245 \frac{273}{273 + 670} = 0.36 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

La pression dynamique

$$P_{dyn} = 5.1 \times 10^{-2} \frac{(1.21)^2}{0.36} = 0.2\text{mmH}_2\text{O}$$

Perte de charge pour 12 rangées des tubes de convection est

$$DPr = n_{rang} \times P_{dyn} \times 0,5 = 12 \times 0,2 \times 0,5 = 1,2\text{mmH}_2\text{O}$$

Débit volumique des fumées dans la cheminée

$$B_f = \frac{G_{ft}}{\varphi_f^{325}} = \frac{13901,37}{3606.0,56} = 6,74 \frac{\text{m}^3}{\text{sec}}$$

Pour une cheminée de diamètre de 0.8m

$$S_{ch} = \frac{\pi D^2}{4} = 0.5024\text{m}^2$$

La vitesse des fumées dans la cheminée

Si nous avons un four de deux cheminées donc

$$W_{ch} = \frac{B_f}{2S_{ch}} = \frac{6,74}{0.5024 \times 2} = 6,74 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La vitesse massique des fumées dans une cheminée :

$$W_{fch} = \frac{G_{ft}}{2 \times S_{ch}} = 13901,37 / (2.0,5024.3600) = 3.76 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2\text{s}}$$

La pression dynamique dans une cheminée :

$$DP = 5.1 \times 10^{-2} \frac{(3.76)^2}{0.56} = 1.28\text{mmH}_2\text{O}$$

Pour une cheminée de 11m de hauteur on peut écrire

$$\frac{H_{ch}}{50D} = \frac{11}{50 \times 0.8} = 0.275$$

La pression dynamique dans la cheminée est exprimée par la somme des pertes de charge

$$\text{Donc} \left(3.5 + \frac{H_{ch}}{50} \right) DP = (3.5 + 0.275) 1.28 = 4.83\text{mmH}_2\text{O}$$

Le tirage nécessaire total

$$P_t = DP_r + DP_{ch} + DP_{Tp} = 1,2 + 4,83 + 5 = 11,03 \text{ mmH}_2\text{O}$$

Donc la hauteur de la cheminée

$$H_{ch} = P_t / (\varphi_{air}^{20} - \varphi_f^{325}) = 11,03 / (1,205 - 0,56) = 17,10 \text{ m}$$

Table N°9: Dimensionnement constructif du four :

	Zone de radiation	Zone de convection	cheminée
Nombre des tubes	38	48	...
Surface des tubes (m ²)	84,01	106,08	...
Hauteur (m)	3,4	2,42	17,10
Section (m ²)	...	5,91	0,5024
Diamètre (m)	...	...	0,8
Nombre des rangés	...	12	...
Largeur (m)	3,00	1,075	.....
Nombre de bruleur	4		
Hauteur du four total (m)	22,10		
Nombre de tube total	86		

VI. Interprétation et discussion des résultats obtenus :

D'après les calculs et le dimensionnement on choisit un four tubulaire (cabine à tubes horizontaux) à deux cheminées de hauteur ($H=17.10\text{m}$), de diamètre ($D=0.8\text{m}$) pour chacune d'elles.

- Deux zones de transferts sont prises en considération :

1/ La zone de radiation :

C'est une zone de transfert par radiation de hauteur ($H=3.4\text{m}$) et de largeur (3m) contenant (38 tubes) de surface totale radiative de ($84,01\text{m}^2$), avec 4 brûleurs.

2/La zone de convection :

C'est une zone de transfert par convection de hauteur ($H=2.42\text{m}$) et de largeur (1.075m) contenant (48 tubes partagés en 12 rangées) de surface totale convective de ($106,08\text{m}^2$).

Ces valeurs demeurent logiques et sont incluses dans les zones permises.

Conclusion et recommandations

VII. CONCLUSION ET RECOMMANDATION

Dans le champ de HBK les eaux produites avec le pétrole sont chargées de différents sels, ces sels sont présents dans le brut sous forme de cristaux ou de fines gouttelettes d'eau dispersées dans le brut.

Les dépôts de sel qui se forment au cours de l'exploitation représentent un grand problème pour la production.

En hiver le traitement chimique n'est pas efficace à cause de la diminution de la température d'huile, cette diminution consiste à former des dépôts de paraffines, ces dernières cachent dans leurs molécules les cristaux de sel et forment ainsi une couche isolante ce qui va les protéger les sels contre l'agent chimique traitant.

Les agents chimiques sont Parfois très chers et moins efficaces surtout en hiver ce qui nous a conduit à dimensionner un four tubulaire pour le préchauffage du brut destiné pour le dessalage.

Ce four tubulaire à deux cheminées se divise en deux zones de transfert : convection et radiation avec un nombre total de tubes de (86) et une hauteur totale de 22.92 m. Ce four peut être résoudre ce problème et suspend l'utilisation de l'anti paraffines.

On recommande d'utiliser la chaleur des fumées pour préchauffer l'air de combustion en amont de la zone de radiation, ou bien l'utiliser comme source d'énergie récupérée dans des échangeurs de chaleur.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

[1] : le pétrole «raffinage et génie chimique» tome 1

Auteur : P. WUITHIER

Editeur : Edition technip 1972(paris)

[2] : récupération assistée du pétrole

Auteur : J.BURGER, P.SOURIEAU,M.COMBARNOUS

Editeur : Edition technip 1984

[3]::mémoire de fin d'étude dimensionnement d'un échangeur de chaleur sur fumée (recupération d'énergie)

Présenté par : Mr:CHIKHA Belgacem Abdelbasset, Mr : LADJDAL Ali Abdellah

Centre universitaire de OUARGLA institut de chimie industerielle promotion 19995/1996

[4] : le raffinage du pétrole «matériels et équipements» tome 4

Auteur : P. TRAMBOUZE

Editeur : Edition technip 1999

[5] Techniques de l'ingénieur par René LELEU (transfert de chaleur)

[6] : étude des fours pétroliers et pétrochimiques

Auteur : J. LE NOGUES

Editeur : Edition technip 1974

[7] : technique de l'ingénieur « Fours industriels »

Auteur : JACUBOWIEZ Isidore

Classification : BE 8842

[8] : le pétrole «raffinage et génie chimique» tome 2

Auteur : P. WUITHIER

Editeur : Edition technip 1972(paris)

[9] : les fours de raffinerie

Association française des techniciens du pétrole

Editeur : Edition technip 1972

[10] : La combustion dans les fours et les chaudières

Auteur : G.MONNOT

Editeur : Edition technip 1978

[11] :operation training-FOR AGL 102.

Editeur : Edition technip 1992.

[12] :memoire de fin d'étude (dimensionnement d'un four et échangeur au niveau guellala)

Université de boumerdes promotion 2007/2008

[13] : production et traitements des pétroles bruts salés, Editeur : Edition technip 1976 (paris)

Annexe

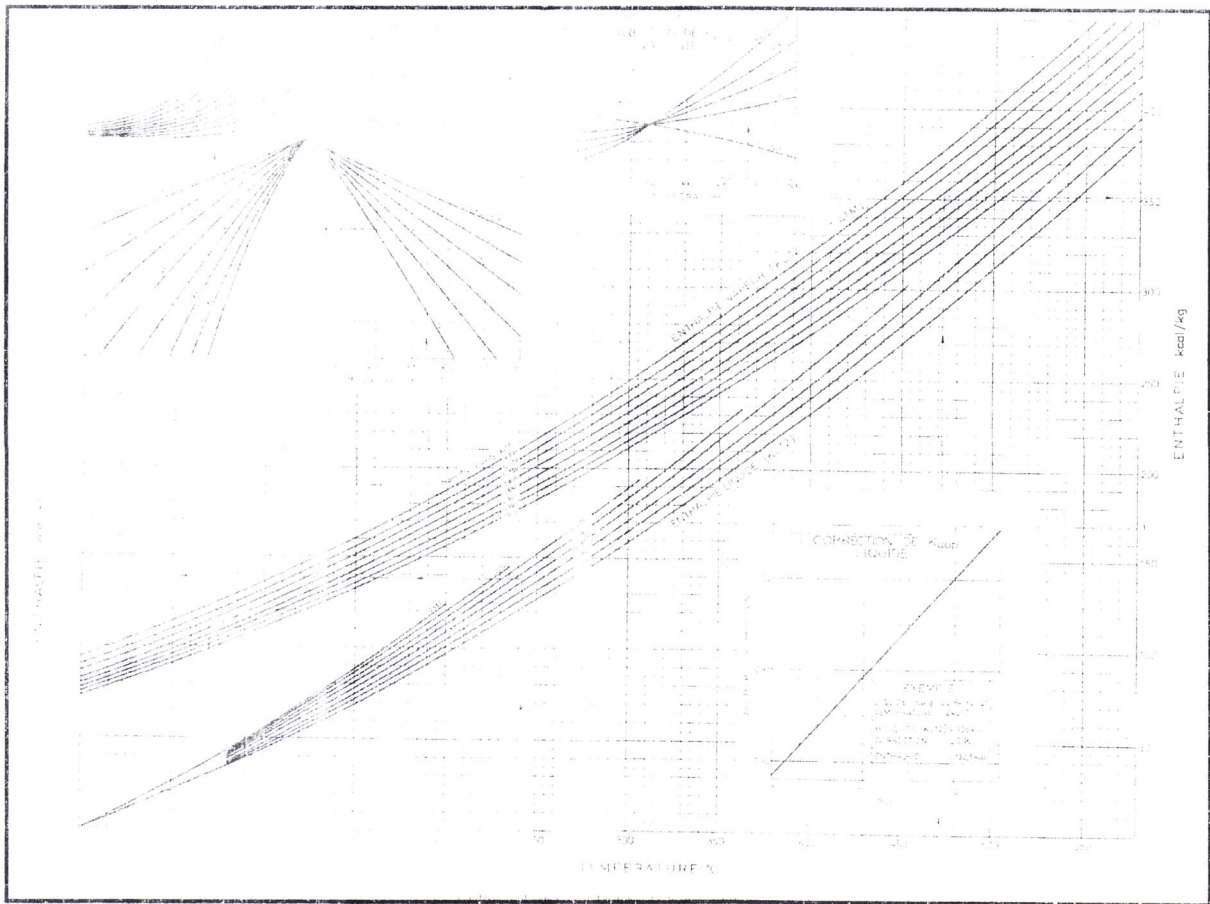


Figure-V -1-
La variation de l'enthalpie

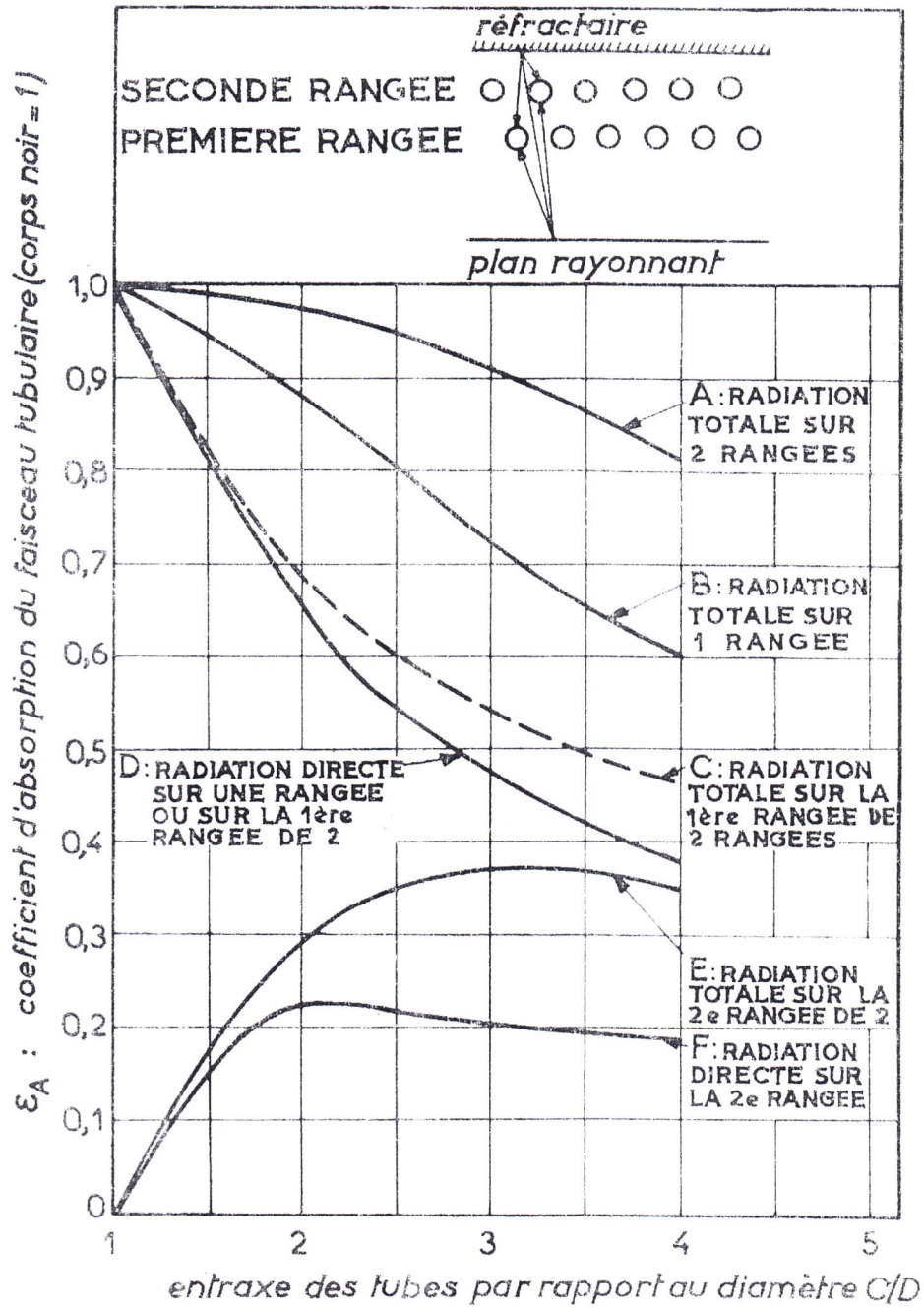


figure-V -2-
Coefficient d'absorption des faisceaux tubulaires

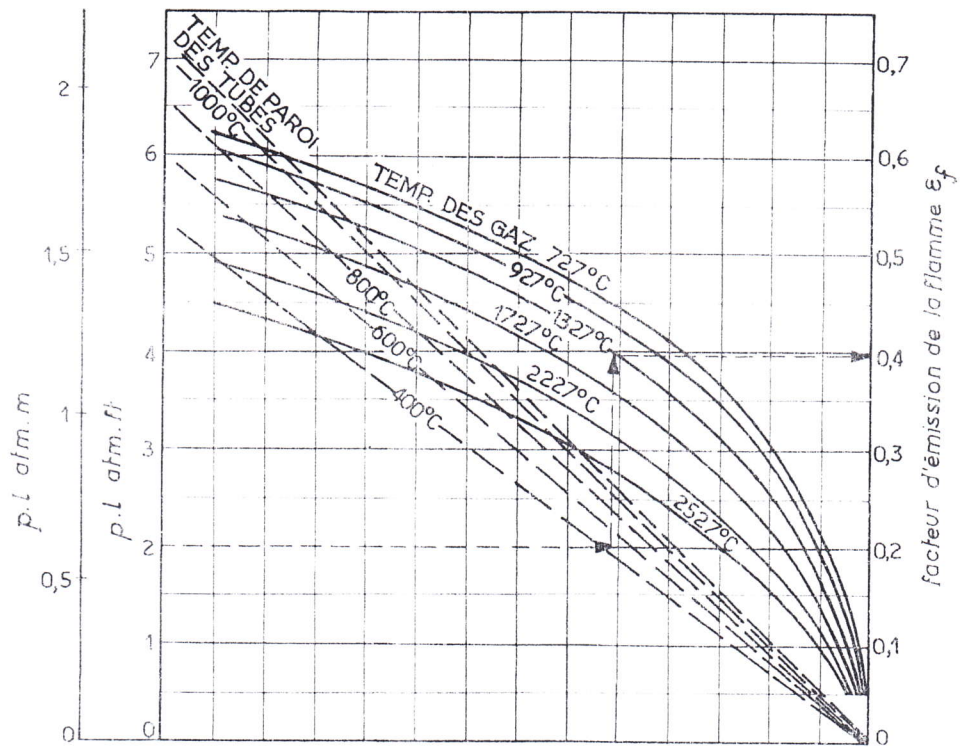


Figure -V -3
Facteur d'émission de la flamme

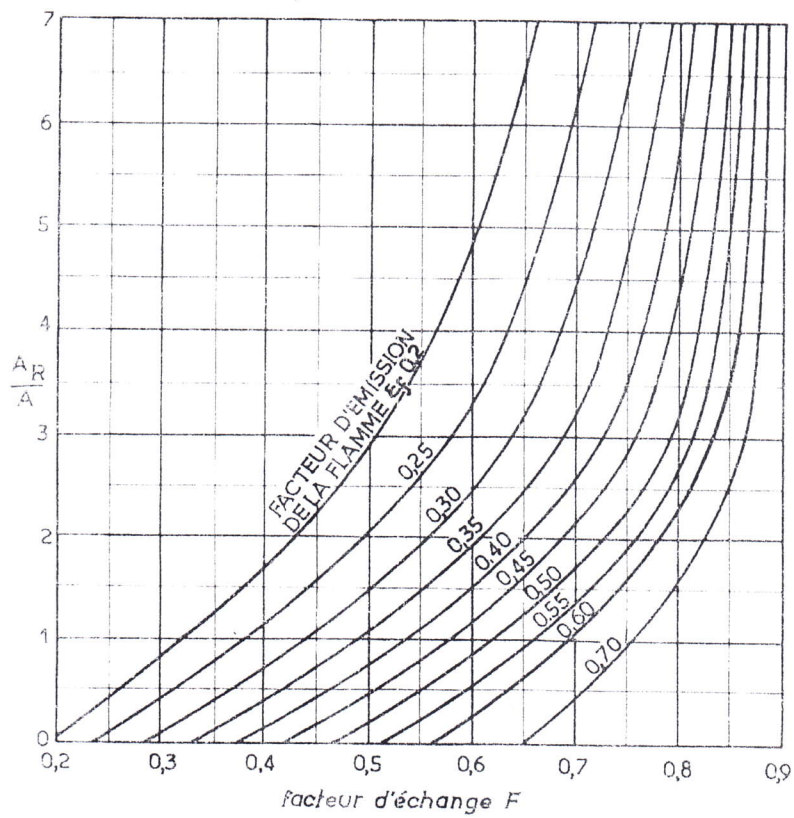
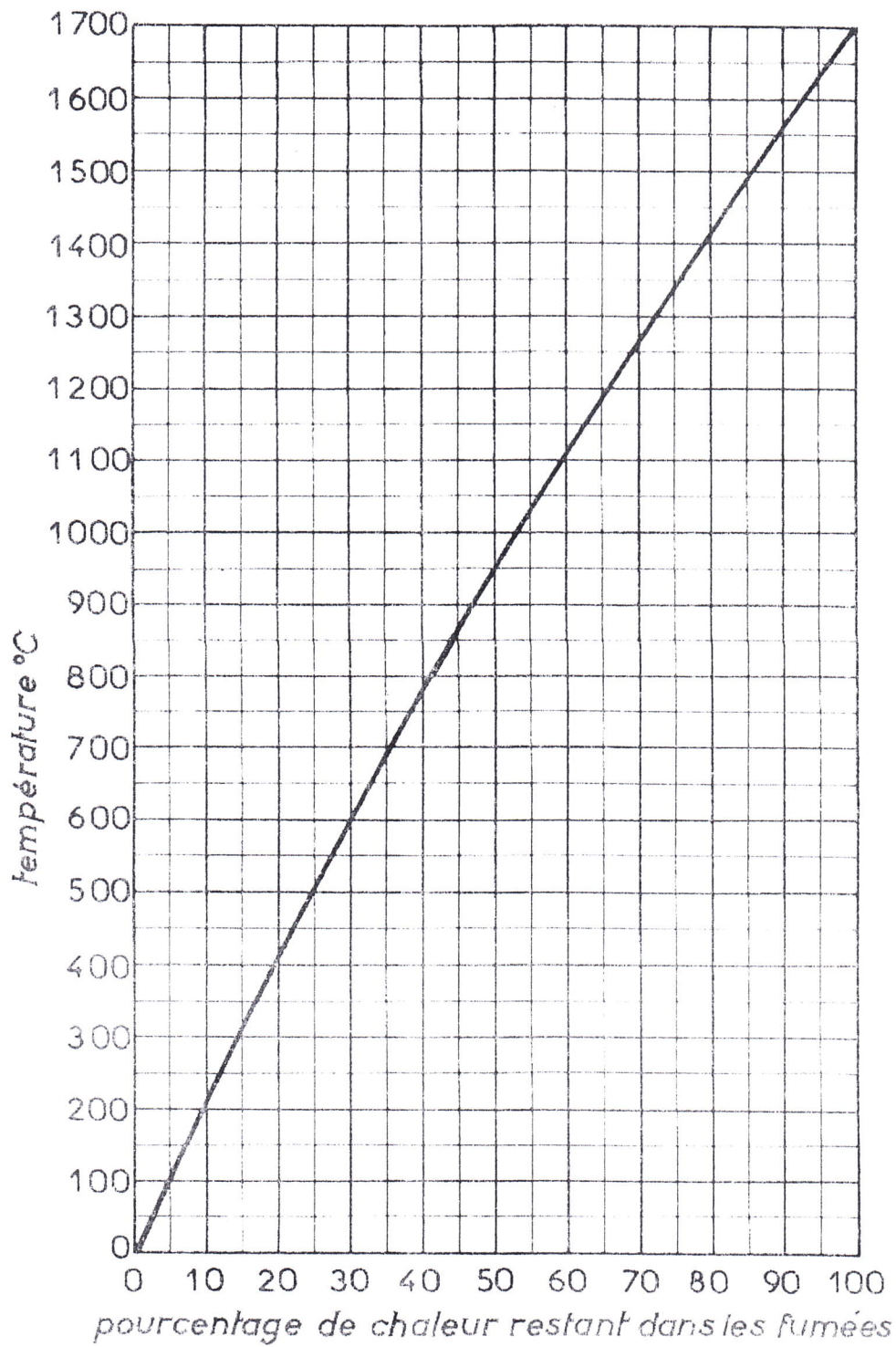


Figure -V-4
Facteur globale d'échange



La figure -V -5

Pourcentage de chaleur restant dans les fumées en fonction de la température

SERVICE	TAUX DE TRANSFERT SUR SURFACE EXTÉR. DES TUBES kcal.h ⁻¹ . m ⁻²
Réchauffage sans vaporisation .	40 000
Distillation atmosphérique.....	20 000 - 40 000
Four rebouilleur	50 000
Distillation sous vide	20 000 - 30 000
Craquage thermique	20 000 - 35 000
Réformation thermique	30 000 - 50 000
Réduction de viscosité	25 000 - 55 000
Redistillation d'huiles ou de dis- tillats	15 000 - 20 000

Tableau -7-
Le taux de transfert

ÉPAISSEUR UTILE DE LA COUCHE DE GAZ

FORME ET DIMENSIONS DU FOUR	ÉPAISSEUR I
<p>FOURS CLASSIQUES</p> <p>1 × 1 × 1 à 1 × 1 × 3 1 × 2 × 1 à 1 × 2 × 4 1 × 1 × 4 à 1 × 1 × ∞</p>	<p>$\frac{2}{3} \sqrt[3]{\text{volume}}$ Plus petite dimension</p>
<p>FOURS CABINES</p> <p>1 × 2 × 4 1 × 2 × 5 à 1 × 2 × 8</p>	<p>$\frac{2}{3} \sqrt[3]{\text{volume}}$ 1,3 fois la plus petite dimension</p>
<p>FOURS CYLINDRIQUES</p> <p>d × d d × 2 d à d × ∞</p>	<p>$\frac{2}{3} \times \text{diamètre}$ 1 fois le diamètre</p>

Tableau -8-
L'épaisseur utile de la couche de gaz

ملخص:

يخضع تسويق البترول الخام حاليا لعقود بين المنتجين، الناقلين، وأصحاب التكرير، حيث تحدد فيه على وجه الخصوص مستويات الملح والماء. طريقة العلاج الكيميائي لمكافحة الملوحة ومكافحة البارافين شتاء في حوض بركاوى مكلفة وأحيانا قليلة الفعالية. و عليه فان تركيب فرن لتسخين الخام أمر ضروري. أدت الحسابات المتعلقة بالفرن إلى الحصول على ما يلي : ارتفاع الفرن 22,92 م، و يتكون من منطقتين للتبادل الحراري : منطقة الإشعاع تحتوي على (38 أنبوب) و منطقة الحمل الحراري تحتوي على (48 أنبوب)، كما يوصى بتركيب الفرن بمدخل الوحدة

Résumé :

Actuellement la commercialisation des bruts est régie par des contrats liant les producteurs, les transporteurs et les raffineurs, et fixant en particulier les teneurs en sel et en eau.

En hiver à HBK le traitement chimique par des agents anti salinité et anti paraffine destiné pour éviter le dépôt de sels contenus dans le brut est parfois chère et moins efficace. Le calcul et le dimensionnement d'un four tubulaire pour le préchauffage du brut est une nécessité.

Le calcul a abouti à un four tubulaire d'une hauteur de 22.92m comprenant deux zones de transfert radiation et convection, ce four doit être installé en amont de l'unité de production afin de résoudre le problème rencontré