



Année Universitaire : 2012-2013



**Master Sciences et Techniques en Génie Industriel**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

**L'amélioration du rendement du four  
011F1 de Topping 2 par procédé du tirage  
forcé**

Lieu : SAMIR à Mohammedia  
Référence : /13-MGI

**Présenté par:**

**Mernissi Khaoula  
EL Aychy Hajar**

**Soutenu Le 21 Juin 2013 devant le jury composé de:**

- **Mr. Haouache (encadrant)**
- **Mr. Gadi (encadrant)**
- **Mr. Chamat (examineur)**
- **Mr. Redouen (encadrant société)**



## Stage effectué à : SAMIR



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

**Nom et prénom: Mernissi Khaoula et EL Aychy Hajar**

**Année Universitaire : 2012/2013**

**Titre: L'amélioration du rendement du four 011F1 de Topping 2 par procédé du tirage forcé**

### Résumé

Le présent travail rentre dans le cadre de la tendance actuelle au sein de la SAMIR, qui vise l'économie de l'énergie et la sauvegarde de l'environnement.

L'objectif à atteindre, c'est l'amélioration du rendement du four 011F1 de Topping 2 de la zone I, et ce via l'installation d'un système de préchauffage de l'air, qui récupère la chaleur perdue dans la fumée.

Un diagnostic de l'état actuel du four nous a permis de déterminer avec précision son rendement, ainsi que les paramètres nécessaires à la réalisation de l'installation proposée.

Un dimensionnement rigoureux du récupérateur de chaleur et des équipements auxiliaires à été fait au cours de ce travail.

A l'issue de cette étude technique, une évaluation économique a été faite pour étudier la faisabilité de projet. Le temps de retour sur l'investissement est 8 mois.

**Mots clés:** Four, Dimensionnement, Préchauffage, Rendement, Combustion, Echangeur, Brûleur, Extracteur, Ventilateur, Régulation, Instrumentation, Investissement.



## Sommaire

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>89</b>
<b>Chapitre I : Présentation de la société .....</b>	<b>90</b>
I. Présentation de SAMIR.....	91
II .Fiche signalétique .....	92
III. Organigramme général .....	92
IV .Les produits pétroliers de la SAMIR.....	93
<b>Chapitre II : Généralités sur les fours .....</b>	<b>98</b>
I. Généralités.....	99
II. Notions sur les fours .....	102
<b>Chapitre III :Diagnostic du Four 011F1.....</b>	<b>105</b>
I .Description du four 011F1 .....	106
II. Etude du problème .....	107
III. Bilan thermique du four 011F1 .....	109
<b>Chapitre IV : Modes de récupération de la chaleur .....</b>	<b>112</b>
I. Généralités sur les systèmes de préchauffage de l'air.....	113
II. Les principaux types d'échangeurs de chaleur .....	113
III. Types des systèmes de préchauffage de l'air.....	116
IV. Choix du type de l'échangeur de chaleur .....	117
V. Considérations générales pour la conception.....	118
VI. Paramètres de marche de la combustion .....	119
VII. Ajustement de l'excès de l'air.....	119
VIII. Fonctionnement en mode naturel.....	119
IX. Contrôle de la température froide des fumées.....	120
X. Dimensionnement de l'échangeur de chaleur .....	120
XI. Considérations pour les fuites d'air dans les fumées.....	121
<b>Chapitre V : Dimensionnement de l'échangeur.....</b>	<b>121</b>
I .Méthode DE DTML.....	122
<b>Chapitre VI : Dimensionnement des équipements auxiliaires .....</b>	<b>129</b>



---

I. Dimensionnement des ventilateurs.....	130
II. Dimensionnement de l'extracteur des fumées .....	135
III. Dimensionnement des bruleurs .....	137
IV. Calorifugeage .....	138
<b>Chapitre VII : Régulation du Four 011F1.....</b>	<b>140</b>
I .But de régulation .....	141
II .Outils utilisés .....	141
III. Description de la régulation.....	146
IV. Amélioration de la régulation du débit d'air préchauffé .....	148
V. Installation après amélioration.....	150
<b>Chapitre VIII : Instrumentation et contrôle.....</b>	<b>151</b>
I.Température .....	152
II.Pression et débit.....	154
III. Analyses .....	155
<b>Chapitre IX : Evaluation économique.....</b>	<b>157</b>
I. Coût d'investissement .....	158
II. Gain annuel.....	161
III. Amortissement et rentabilité du projet .....	162
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>166</b>



## INTRODUCTION GENERALE

L'exploitation de l'énergie dans les différents domaines d'industrie est considérée comme un élément très important sur lequel il faut agir de telle sorte que tous les processus industriels fonctionnent avec le minimum possible d'énergie consommée. Cet aspect s'accroît avec la nouvelle conjoncture internationale de la hausse des prix énergétiques.

Dans cette perspective, notre travail consiste à optimiser l'utilisation d'énergie par des méthodes scientifiques et techniques pouvant être appliquées dans les différentes disciplines de l'industrie de transformation et de pétrochimie.

La consommation énergétique dans le domaine de raffinage du pétrole est très importante, et cela apparaît dans les différentes unités telles que la distillation, le craquage ainsi que la production des utilités (vapeur d'eau).

Avant que le flux d'alimentation arrive à la colonne de distillation, il passe par un train d'échange pour le préchauffage puis par le four de chauffage direct pour atteindre les températures de séparation.

L'objectif de notre travail est d'optimiser l'efficacité du four O11F1 de Topping 2, conçu dans les années 60, par la mise en place d'un système de récupération de la chaleur à partir des fumées.

La méthodologie adoptée pour atteindre l'objectif de ce travail est résumée comme suit :

- Chapitre I : Présentation de la société.
- Chapitre II : Généralités sur les fours.
- Chapitre III : Diagnostic du four O11F1.
- Chapitre IV : Modes de récupération de la chaleur.
- Chapitre V : Dimensionnement de l'échangeur de chaleur.
- Chapitre VI : Dimensionnement des équipements auxiliaires.
- Chapitre VII : Régulation du four O11 F1.
- Chapitre VIII : Instrumentation et contrôle.
- Chapitre IX : Evaluation économique.



## I. Présentation de SAMIR

La SAMIR (Société Anonyme Marocaine d'Industrie de Raffinage), leader dans le domaine de raffinage de pétrole, créée en 1959 pour assurer un approvisionnement permanent en matière d'énergie, ce qui procure au pays une certaine autonomie, et aide à faire face aux défis du développement.

Le raffinage représente la principale activité au sein de la SAMIR, et cette dernière à elle seule dispose d'une capacité de raffinage de 8 000 000 Tonnes/an (propane, butane, fuel-oil, huile de base, bitumes, paraffines...) à partir du pétrole brut importé d'Arabie Saoudite (Arabian light), D'Irak (Kirkuk), d'Iran (Iranian light) et de Russie (Ural).

La SAMIR est une filiale à 67,27% de Corral Holding (Société de droit suédois à capitaux saoudiens). Le reste, soit 32,73% est détenu par divers actionnaires à la bourse de Casablanca.

La SAMIR reçoit cinq pétroliers de brut par mois et exporte 25% de sa production.

Dans le cadre de la première phase du processus de privatisation de la société en 1996, la SAMIR est introduite à la bourse de Casablanca, avec une part de 30% du capital social.

En 1998, le Groupe Saoudien Corral a acheté 64,73% de la SAMIR, et en 1999 la SAMIR est fusionné avec la SCP (Société Chérifienne du Pétrole).

En 2004, le Groupe Saoudien Corral s'est engagé à moderniser la SAMIR avec un investissement dont l'enveloppe globale s'élève à plus de 7 millions de Dirhams.

Aujourd'hui la SAMIR s'inscrit dans une démarche qualité, en faisant la reconstruction de ses départements, et la formation de personnels pour s'orienter vers l'amélioration continue de la société.



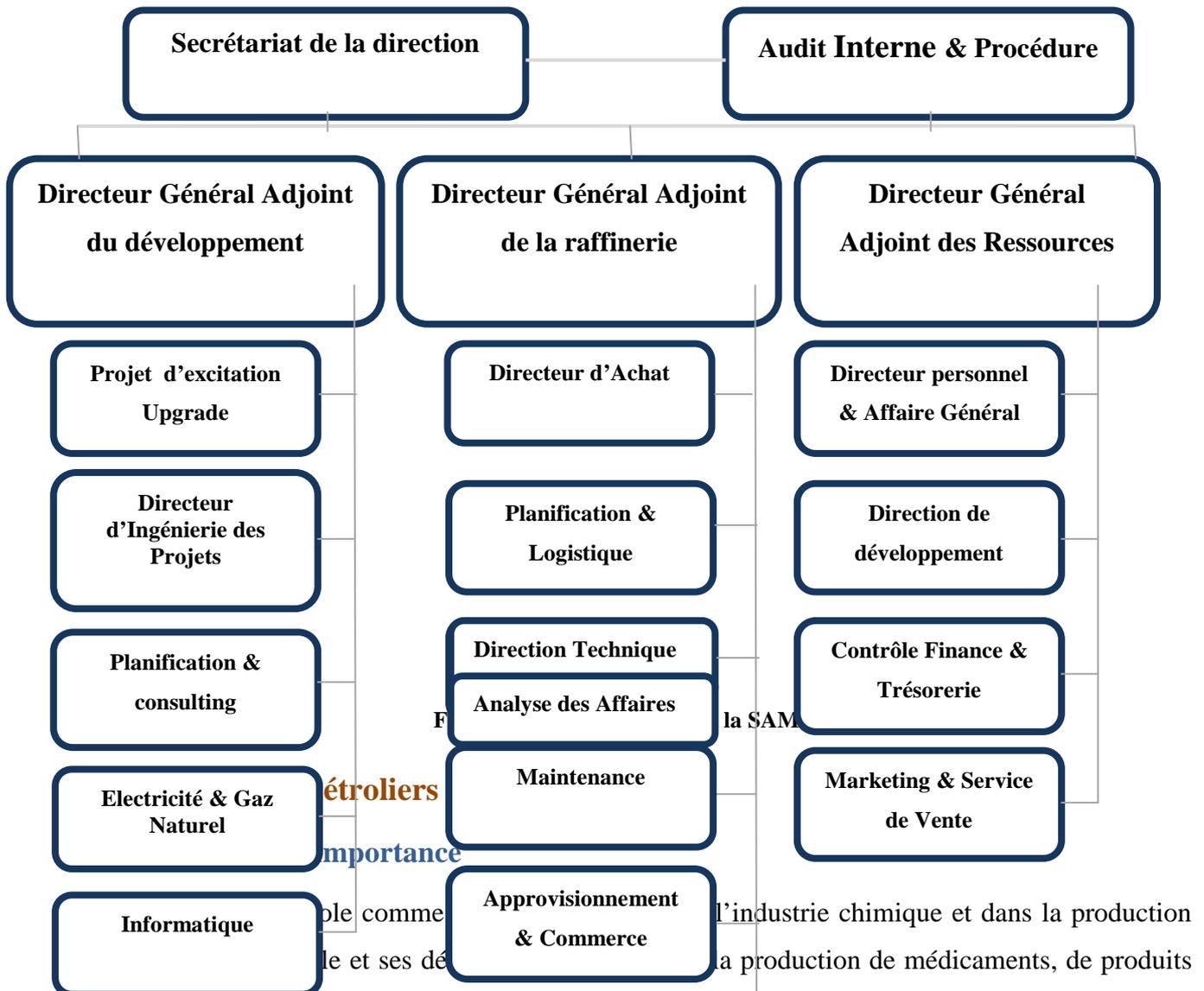
## II .Fiche signalétique

<b>Raison Social</b>	SAMIR (société anonyme marocaine de l'industrie du raffinage)
<b>Capital Social</b>	1.236.586.500.DH
<b>Adresse</b>	route côtière 111, BP : 89.Mohammedia Tél. (212) 0523324201/0523312240/0523327480 Fax. (212) 0523316956/0523317188
<b>Date de création</b>	1959 par l'état marocain et l'office italien des Hydrocarbures
<b>Président/Directeur général</b>	Mohammed Hussein Sheikh al Amoudi/ Jamal Ba-Amer
<b>PATENTE</b>	39404860
<b>Secteur d'activité</b>	raffinage du pétrole, exploration pétrolière
<b>Capacité de production</b>	8 000 000 tonnes/an
<b>Chiffre d'affaire</b>	37 Milliards de DH (Exercice 2010)
<b>Effectif</b>	1528
<b>Site Internet</b>	<a href="http://www.SAMIR.ma">www.SAMIR.ma</a>
<b>Actionnariat</b>	CORRAL (67.27 %)
<b>Capacité de production</b>	6,25 T/An

**Tableau 1: Fiche signalétique de la SAMIR**

## III. Organigramme général





En effet notre civilisation industrielle moderne dépend du pétrole et de ses dérivés, la structure physique et le mode de vie des communautés urbaines entourant les grandes villes sont le résultat d'un approvisionnement en pétrole à grande échelle et peu coûteux.

C'est la première source d'énergie mondiale, il fournit près de la moitié de la demande totale d'énergie primaire.



Le pétrole est devenu une arme politique, comme l'ont démontré les deux chocs pétroliers des années 1970. L'offre et la demande de pétrole, son prix, les solutions de remplacement et les économies d'énergie sont des questions constamment débattues.

## IV.2 Les dérivés du pétrole

Le traitement du pétrole brut permet de dégager certains composants à Caractère chimique différent à savoir

Produits pétroliers	Utilisations
<b>Propane</b>	combustible dans le secteur industriel, chauffage domestique et hôtelier
<b>Butane</b>	combustible à usage domestique (cuisine, chauffage,...)
<b>Naphta</b>	Elément utilisé dans les industries pharmaceutiques
<b>Jet A1</b>	Carburant pour avion, extrait du Kérosène
<b>Fuel-oil</b>	Combustible consommé dans les fours et les chaudières industrielles
<b>Paraffines</b>	Elément utilisé dans l'industrie des bougies, pneumatique...
<b>Bitumes</b>	Elément utilisé dans la construction des routes, étanchéité des bâtiments et pneumatique
<b>Pétrole lampant</b>	Il est utilisé comme solvant dans l'industrie chimique
<b>Gasoil 50, Gasoil 350</b>	Carburants pour les moteurs diesels
<b>Essence super sans plomb</b>	Carburant des moteurs à allumage commandé
<b>Huiles de base 150 NS, 300 NS, 600 NS et BBS</b>	Eléments qui rentrent dans la fabrication des huiles finies. Elles sont destinées aux sociétés qui fabriquent les huiles lubrifiantes

Tableau 2: Liste des produits pétroliers de la SAMIR

IV.3

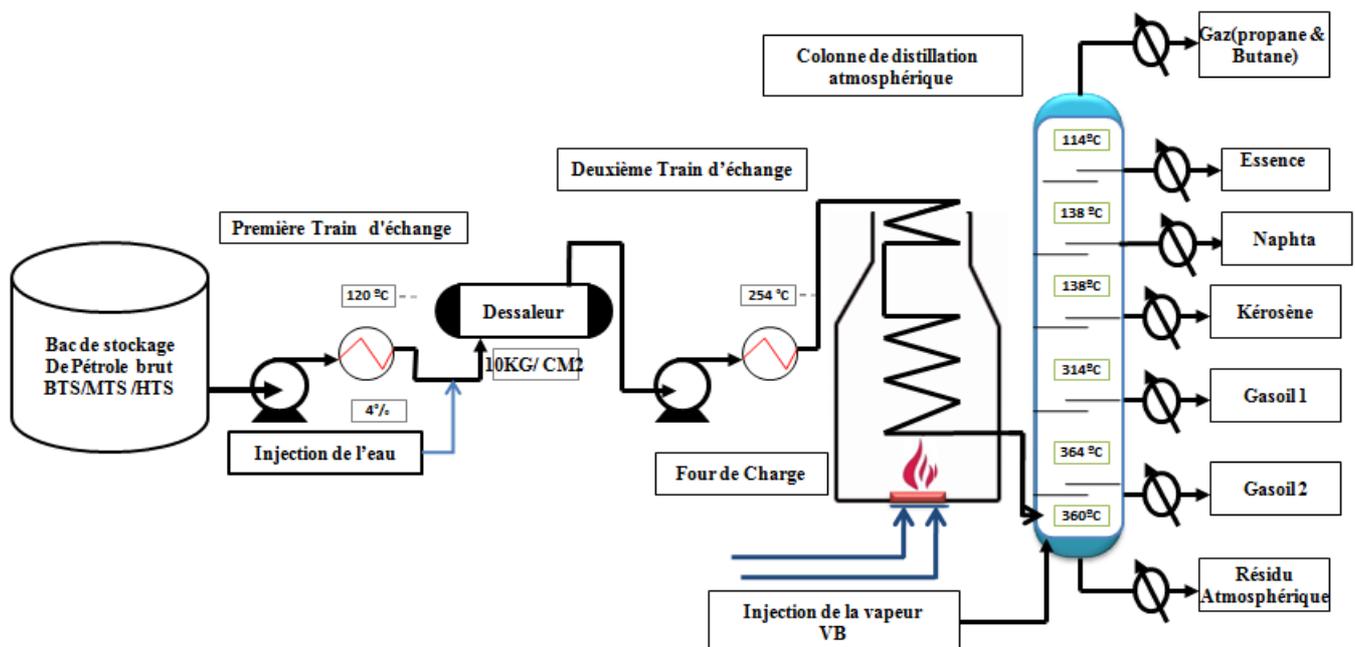


## Les installations techniques

SAMIR se divise en 3 grandes zones industrielles. Chaque zone englobe des unités de fabrication ou de traitement, on distingue :

- **ZONE I** : MEROX – TOPPING I ET II- PLATFORMIN-CTE I-MPE I
- **ZONE II** : PLATFORMING II ; TOPPING III ; HDS ; HDT ; SEPRATION C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub>; CTE I - MEROX - COMPLEXE DES HUILES LUBRIFIANTES;MPE II
- **UPGRADE**

**TOPPING** : Ce sont des unités qui englobent en plus de la colonne de distillation atmosphérique, où s'effectue la séparation des différentes coupes de pétrole brut par vaporisation et condensation fractionnée, des fours pour le préchauffage du pétrole brut ainsi que des colonnes de stabilisation et de splitter.





**PLATFORMING** : C'est une unité de traitement des essences lourdes, adoucie en **HDT** afin d'augmenter leur indice d'octane, ce qui permet l'élévation du taux de compression et l'amélioration du rendement des moteurs à combustion.

**H.D.T** : Unité consiste à un **Hydrotraitement** d'Essence Lourde afin d'éliminer les composés indésirables du Gasoil. Cette unité permet grâce à l'injection d'hydrogène et sous l'action des catalyseurs d'obtenir des produits dont la teneur en soufre est très faible.

**MEROX**: Procédé de purification des produits pétroliers légers « tels que : GPL, Essences, Kérosène » en vue d'éliminer les odeurs désagréables causées par les composés sulfurés ( $H_2S$ , R-SH.) et cela par une réaction d'oxydation des **mercaptans** d'où le nom **anglais MEROX**.

**UPGRADE** : Considéré comme étant la plus grande réalisation que l'industrie nationale du raffinage ait connu depuis la création du complexe SAMIR des huiles lubrifiantes en 1984, le

projet de modernisation de la raffinerie de Mohammedia intègre tous les éléments de la stratégie pétrolière nationale, telle que définie par les Hautes Directives Royales du 4 mai 2004, et englobe les technologies les plus modernes et les procédés les plus performants dans le domaine du raffinage.

Ce projet, qui a démarré en septembre 2005, fait partie intégrante du programme général de modernisation de la raffinerie de Mohammedia, ayant fait l'objet de la Convention d'Investissement signée le 20 décembre 2004 entre le Gouvernement Marocain et la SAMIR. Le budget global y afférent est estimé à plus de 1 milliard de Dollars US.





## Chapitre II : Généralités sur les fours



## I. Généralités <sup>[1]</sup>

Un four est une pièce d'équipement dans laquelle la chaleur dégagée par la combustion de fuel oïl ou gaz combustible par l'intermédiaire de brûleurs, est transféré à un fluide (l'huile chaude par exemple) passant dans des tubes.

Le combustible est brûlé sous des conditions contrôlées dans une chambre appelée : chambre de combustion. La chaleur dégagée est transmise à travers la paroi des tubes au produit. Ces tubes sont placés généralement le long des murs et au plafond du four. Les produits de combustion s'échappent du foyer vers l'atmosphère par l'intermédiaire d'une cheminée.

### I.1. Classification

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

Nous proposons ici deux classifications, en fonction :

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

#### I.1.1. 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.
- Dans un four discontinu, le produit à chauffer est immobile dans le four ; il est chargé et déchargé (enfourné et défourné) au même endroit.

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

- Dans un four continu, un point du four sera toujours (ou à peu près) à la même température.



- Dans un four discontinu la température en un point donné du four évoluera en fonction du cycle de chauffage que l'on veut faire subir au produit.

### I.1.2. Chauffage direct et chauffage indirect

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

- **Fours à chauffage direct** : il ya contact entre les gaz issus de la combustion et les produits à chauffer. du point de vue thermique, cela entraine qu'une partie du transfert de chaleur s'effectue par convection.
- **Fours à chauffage indirect** : l'interaction entre les gaz de combustion et les produits n'existe plus. Par contre, il s'introduit une résistance supplémentaire au transfert de chaleur qui doit se faire par conduction au travers de la paroi protectrice, puis par rayonnement et éventuellement convection vers la charge.

### I.2. Principaux types de fours

Il existe une grande variété de fours tubulaire qui diffèrent notamment par leur géométrie :

- **Les fours cylindriques verticaux** : Dans ces fours, les brûleurs qui sont situés sur la sole du four réalisent le mélange air-combustible et la combustion.

Les flammes se développent dans la zone de radiation dans les tubes sont chauffés par rayonnement. Au sommet de la zone de radiation, la température des gaz de combustion est de l'ordre de 700 à 800°C et de ce fait le rayonnement est plus faible.

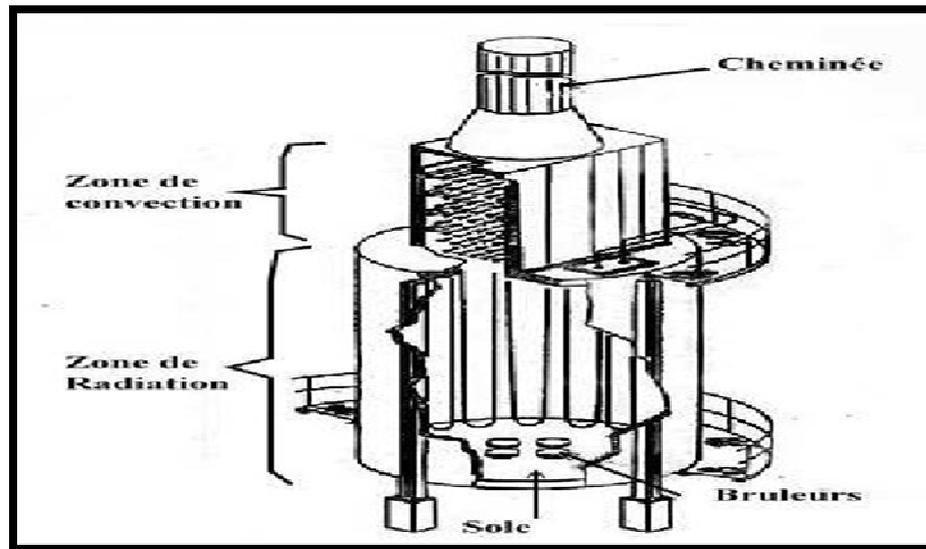


Figure 0: Four cylindrique vertical.

- *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, ou encore sur les murs d'extrémités ne recevant pas les tubes

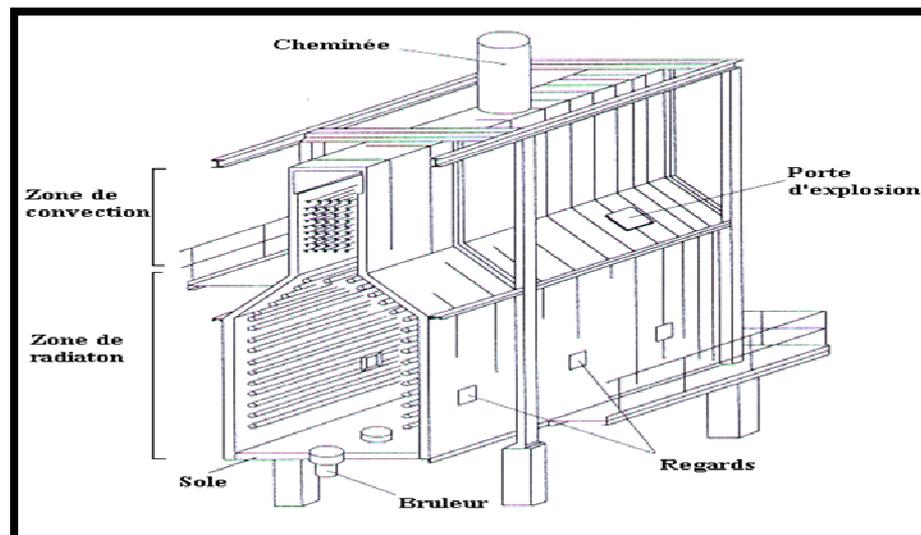


Figure 4 : Les fours dits « cabines » à tubes horizontaux.



### I.3. Les éléments des fours

En général, un four se compose de :

- *Une enveloppe métallique* appelée « casing ».
- *Une zone de rayonnement* formant une chambre de combustion, garnie intérieurement de matériaux réfractaires isolants.
- *Un faisceau tubulaire* en zone de rayonnement et éventuellement en zone de convection.
- *Une zone de convection* éventuellement garnie.
- *Une cheminée* ou un carneau avec registre pouvant être garni (circuit fumées).
- *Des accessoires* divers tels que : souffleurs, portes d'accès, portes d'explosion, regard, thermocouples...

## II. Notions sur les fours <sup>[2]</sup>

### II.1. Définition

La combustion est une réaction chimique rapide exothermique qui se produit au cours de l'oxydation des constituants du combustible par l'agent oxygène pris dans l'air libre en présence d'une flamme. Elle se manifeste par un dégagement de chaleur.

Le combustible est une substance (solide, liquide, ou gazeuse) qui peut se combiner facilement avec l'oxygène selon une réaction chimique. Cette combinaison dite combustion se manifeste généralement par les flammes ou l'incandescence des corps qui brûlent et elle s'accompagne d'un important dégagement de chaleur. Dans la pratique l'oxygène utilisé dans la combustion provient de l'air.

On distingue dans la combustion :

- **Combustion neutre** : la combustion est neutre lorsque l'air utilisé est en quantité égale à la valeur stœchiométrique. L'oxygène apporté doit théoriquement suffire exactement à assurer une combustion complète (transformation de tout le C en CO<sub>2</sub>), chose qui n'est pas réalisée en pratique.



- Combustion oxydante : réaction chimique qui se fait avec un excès d'air. En pratique, on est obligé d'utiliser une quantité d'air supérieure à la valeur stœchiométrique pour assurer une combustion complète et éviter une perte de combustible.
- Combustion carburante ou réductrice : combustion qui se fait avec un défaut d'air ou une mauvaise atomisation et qui entraîne des pertes de chaleur.
- Le pouvoir comburivore est la quantité d'air nécessaire pour brûler 1 Kg de combustible.
- Le pouvoir fumigène est la quantité de fumées dégagées lors de la combustion d'1 Kg de combustible.
- L'excès d'air : il est défini comme étant la différence entre la quantité d'air utilisée et la valeur stœchiométrique exprimée en (%).

## II.2. Rôle du brûleur

Le brûleur est un appareil destiné à régler une combustion, il a un rôle primordial dans la conception, la construction et le fonctionnement des fours :

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

## II.3. Types du brûleur

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

On distingue :

- Les brûleurs à prémélange.
- Les brûleurs à flamme de diffusion.

### II.3.1. Les brûleurs à prémélange

Le mélange entre le combustible et le comburant se fait préalablement à son introduction dans le four.

Ces brûleurs sont uniquement des brûleurs à combustible gazeux. Ils produisent des flammes courtes et permettent d'obtenir localement des températures très élevées. Des précautions particulières doivent être prises pour éviter la propagation de la combustion, vers l'amont, jusqu'au dispositif de mélange (retour de flamme).

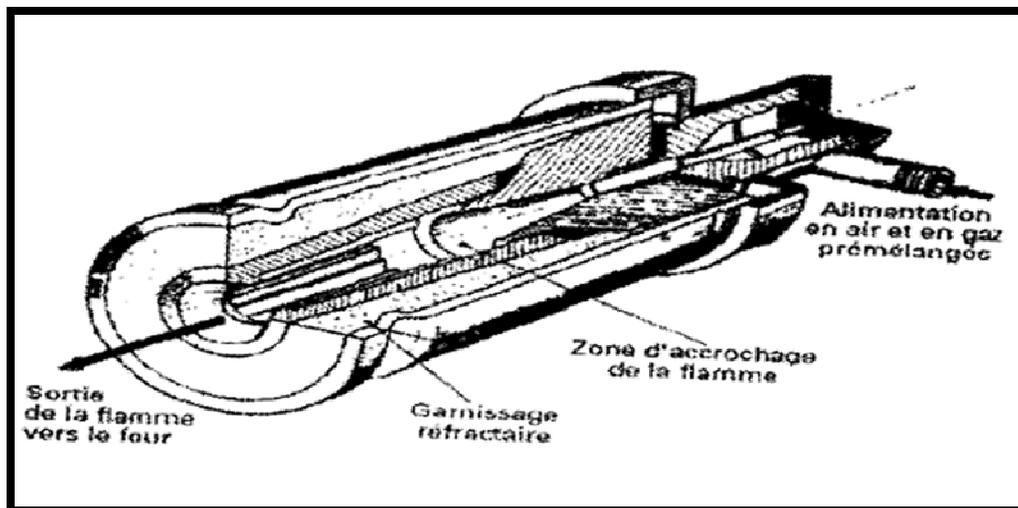


Figure 5: Brûleur à prémélange

### II.3.2. Les brûleurs à flamme de diffusion

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



## Chapitre III : Diagnostic du Four 011F1

## I .Description du four 011F1

Le four 011F1 de Topping 2 est un four cylindrique à serpentins tubulaires, de moyenne capacité (30000 tonnes/jours), utilisé pour le chauffage du pétrole brut qui provient des échangeurs de préchauffages avant de l'acheminer vers la colonne de distillation

Généralement le four se constitue des éléments suivants :

- Les brûleurs : les brûleurs sont situés sur la sole du four, et réalisent le mélange air-combustible pour avoir une combustion complète.
- Une zone de radiation : les flammes se développent dans la zone de radiation, dans laquelle les tubes sont chauffés par rayonnement. Au sommet de la zone de radiation, la température des gaz de combustion est de l'ordre de 700 à 800 °C.
- Une zone de convection : La récupération de la chaleur des fumées est poursuivie dans la zone de convection, fonctionnant comme un échangeur tubulaire. Les fumées refroidies sont évacuées vers l'atmosphère par la cheminée.



Figure 6: Four cylindrique à tubes « 011F1 »



## II. Etude du problème

### II.1 Diagnostic du four actuellement

Le four 011F1 fait parti de Topping 2 qui est une installation de raffinage de pétrole très ancienne, qui date des années soixante, et donc les pertes thermiques sont susceptibles d'être très élevées, que ce soit par les parois ou bien par les fumées, et par conséquence le rendement est faible.

Généralement les pertes par parois sont évaluées par le constructeur de 2% de la chaleur dégagées par le combustible, est tout ce qu'on peut faire pour minimiser les pertes par parois compte sur les opérations de maintenance et de nettoyages quotidiens (ex : le ramonage...).

Il s'avère que les pertes de chaleur par les fumées sont très élevées par rapport aux pertes par parois, donc toute amélioration de rendement sera apporté par une récupération éventuelle de la chaleur dissipée dans l'atmosphère via les fumées.

### II.2 Consommation du combustible

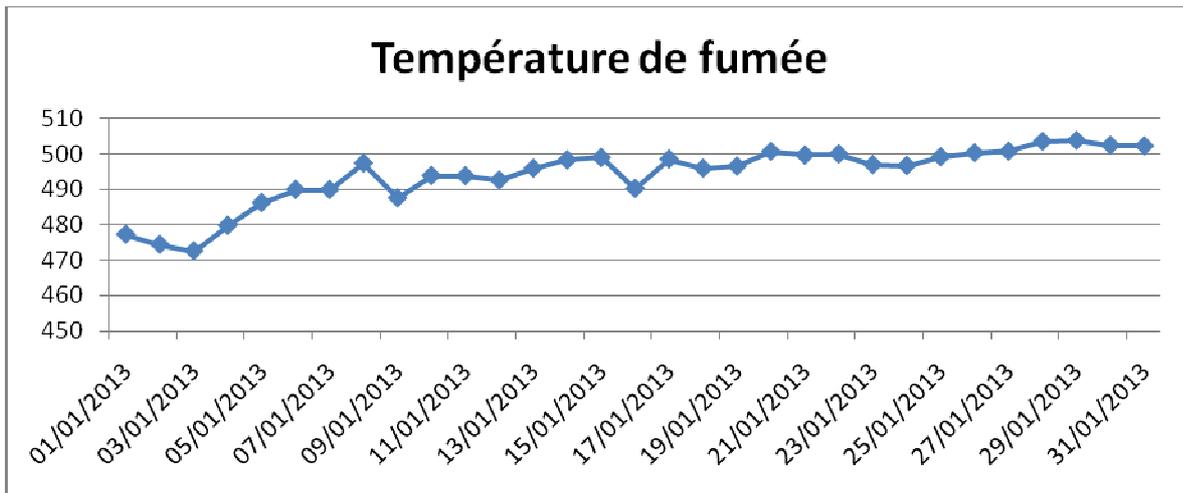
Les pertes thermiques dans le four se traduisent par une augmentation de la consommation du combustible, et donc l'augmentation de la facture énergétique <sup>[3]</sup>.

### II.3 Suivi des températures des fumées

La température des fumées représentent l'un des paramètres clés qui renseignent sur le rendement du four.

La récupération de l'énergie contenue dans les fumées permet une amélioration très importante en ce qui concerne le rendement du four.

La figure ci-dessous représente l'évolution de la température des fumées du four 011F1 pendant le mois de janvier 2013.



**Figure 7: Evolution de la température durant le mois janvier 2013**

- Nous constatons d'après l'analyse de la courbe que la température des fumées oscille autour d'une valeur moyenne de 494 °C.

Une température de 494°C pour les fumées informe sur le fait qu'il y a une énergie thermique importante dissipée dans l'air, notre étude sera consacrée au dimensionnement d'une installation industrielle, qui permettra l'amélioration du rendement du four en récupérant le maximum de chaleur contenue dans les fumées c'est le système du tirage forcé.

#### II.4 Tirage forcé

L'objet du système de tirage forcé est d'améliorer le rendement du four et réduire sa consommation en combustible. Vu que la température de sortie des fumées dans le fonctionnement à tirage naturel est très élevée (494°C), le but de ce nouveau système sera d'abaisser cette température et de la stabiliser à 200°C par récupération de la chaleur à travers un échangeur air comburant-fumée.

La mise au point d'un tel système nécessite de nouvelles composantes afin d'en assurer les bonnes performances. Ainsi, les éléments nécessaires à l'installation sont :

- Tuyauterie pour la circulation du fluide air froid, air chaud.
- Tuyauterie pour la circulation des fumées froides et chaudes.

- Extracteur de fumée
- Echangeur à plaques
- 2 Ventilateurs d'air

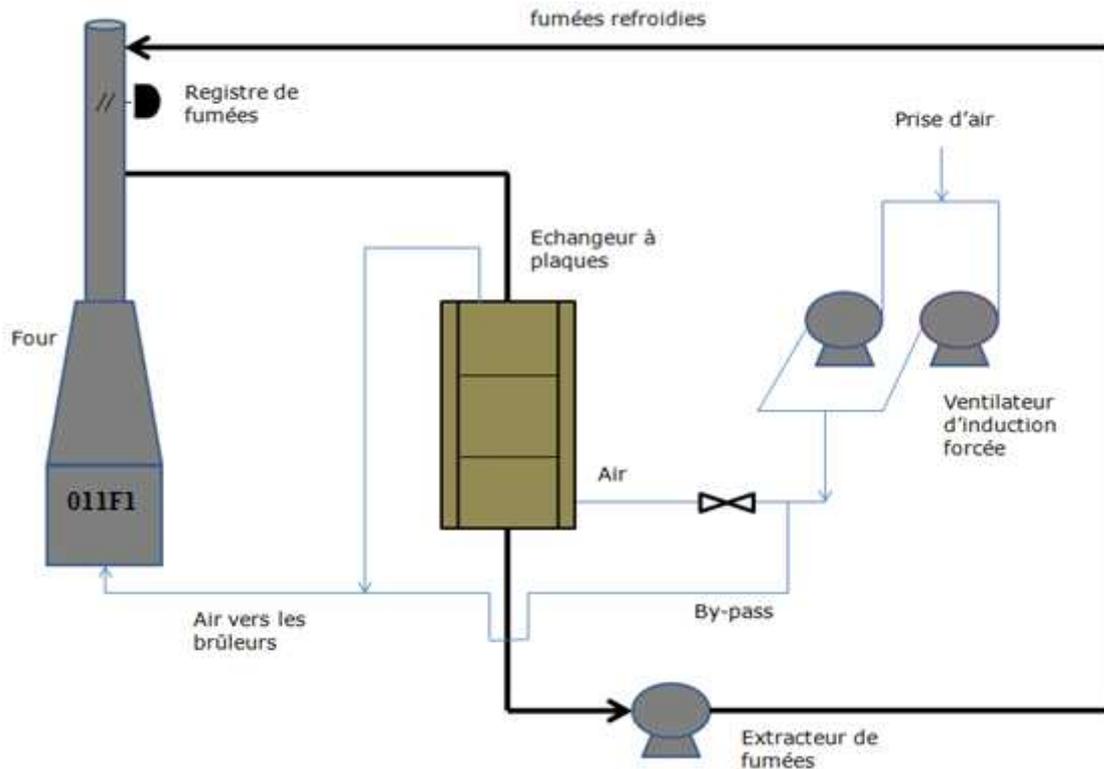


Figure 8: Circuit du système à tirage forcé

### III. Bilan thermique du four 011F1

L'établissement du bilan thermique d'un four a pour but de déterminer son rendement et sa consommation spécifique, c'est-à-dire la consommation rapportée à l'unité utile produite. Cela suppose la connaissance la plus précise possible de tous les flux entrant et sortant du four (matières et produits divers, énergies diverses, etc.) et une bonne interprétation des phénomènes thermiques dont le four est le siège <sup>[3]</sup>.

### III.1 Rendement

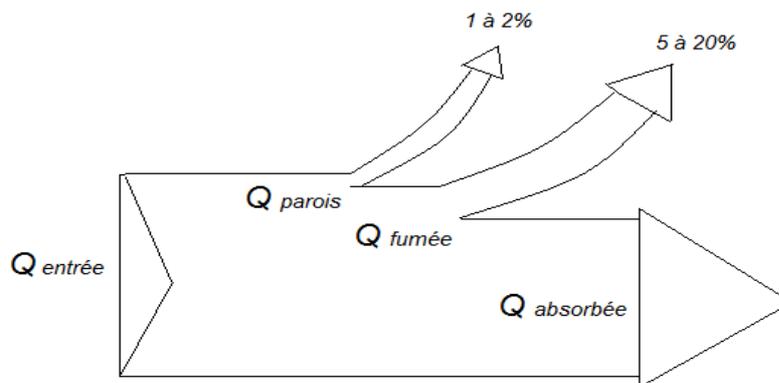
La notion de rendement d'un four apparaît par le fait que le débit de chaleur libérée aux brûleurs par la combustion n'est pas intégralement transmis au fluide procédé. On constate en effet des pertes thermiques qui ont essentiellement deux origines :

- Les pertes par les parois du four sont dues aux imperfections de l'isolation thermique par les matériaux réfractaires. Dans le cas de fours récents, de grande puissance thermique, elles représentent 1 à 2% de chaleur libérée aux brûleurs<sup>[4]</sup>.

Elles peuvent être beaucoup plus importantes dans le cas de fours anciens dont le réfractaire est défectueux.

- Les pertes par les fumées qui évacuent à l'atmosphère un débit de chaleur relativement important représentant en général entre 5 et 20% de celui qui est libéré aux brûleurs<sup>[4]</sup>.

Le diagramme de SNAKE ci-dessous montre les différents flux énergétiques d'un four et permet de mettre en évidence la définition du rendement.



**Figure 9: Le diagramme de SNAKE**

- Le rendement d'un four est défini comme le rapport du débit de chaleur absorbée par le fluide procédé au débit de chaleur fourni au four par la combustion ( $Q_{\text{entrée}}$ )<sup>[4]</sup>

Le calcul du rendement du four par la méthode directe, est donné par la formule :



$$\text{Rendement} = \eta = \frac{Q_{\text{absorbée}}}{Q_{\text{entrée}}} * 100$$

$$\eta = \frac{Q_{\text{absorbée}}}{Q_{f_g} + Q_{f_o} + Q_{\text{vap}} + Q_{\text{air}}} * 100$$

Avec :

- $Q_{\text{absorbée}}$  : La chaleur récupérée par le pétrole brut ;
- $Q_{\text{air}}$  : La chaleur apportée par l'air de combustion ;
- $Q_{f_o}$  : La chaleur apportée par le fuel oil ;
- $Q_{f_g}$  : La chaleur apportée par le fuel gaz ;
- $Q_{\text{vap}}$  : La chaleur sensible apportée par la vapeur d'atomisation ;
- $21^{\circ}\text{C}$  : La température de référence ;

Soit encore :

$$\text{Rendement } \eta (\%) = 100 \% - \% \text{ pertes fumées} - \% \text{ pertes parois}$$

Avec :

$$\% \text{ Pertes par fumées}^{[5]} = 0,0375 * \left( \frac{T_{\text{amb}}}{(T_{\text{amb}} - \% O_2)} \right) * (T_f - T_{\text{amb}}) ;$$

$$\% \text{ Pertes par parois} = 2\% ;$$

### 3.1.1 Calcul du Rendement

On observe que le calcul du rendement est plus simple en utilisant la deuxième formule.

$$\eta (\%) = 100\% - 0,0375 * \left( \frac{T_{\text{amb}}}{(T_{\text{amb}} - \% O_2)} \right) * (T_f - T_{\text{amb}}) - 2\%$$

Avec:

$$T_{\text{amb}} : \text{Température ambiante} = 21^{\circ}\text{C} ;$$



$T_f$  : Température de fumée = 494°C ;

% O : Pourcentage d'oxygène = 6% ;

Le rendement actuel du Four 011F1 :

$$\eta (\%) = 73,17\%$$

### III.2 Les pertes de chaleur

On a:

$$\eta_1 * Q_{abs \text{ corrigée}} = \eta * Q_{abs} \quad [14]$$

Donc :

$$Q_{abs} = \frac{\eta_1 * Q_{abs \text{ corrigée}}}{\eta}$$

Avec :

$\eta_1$  : Le rendement avec la température de fumée de design  $T=351^\circ\text{C}$  «80.92%» ;

$Q_{abs \text{ (corrigé)}}$  : La chaleur de design absorbée corrigée ;

$$Q_{abs \text{ (corrigé)}} = 17,5 \cdot 10^6 * 0,8 = 14 \cdot 10^6 \text{ Kcal/h ;}$$

$Q_{abs}$  : La consommation réelle en Kcal/h ;

$$Q_{abs} = \frac{0,8 * 14 * 10^6}{0,73} = 15,43 * 10^6$$

#### Les pertes de chaleur DQ :

$$\Delta Q = Q_{abs} - Q_{abs \text{ corrigée}}$$

$$\Delta Q = 15,43 * 10^6 - 14 * 10^6 = 1,43 * 10^6 \text{ Kcal/h}$$

On a des pertes dans le four qui s'avère à  $1,43 \cdot 10^6$  Kcal/h ce qui nécessite une amélioration du rendement du Four.



Il existe plusieurs voies pour améliorer le rendement énergétique des fours. Dans notre cas, étant donné que les pertes des fumées à 494°C sont la principale cause, la solution la plus évidente est d'exploiter cette chaleur. Ainsi, on optera dans notre étude à l'option du préchauffage de l'air de combustion par cette fumée à travers la disposition d'un échangeur de chaleur.

## I. Généralités sur les systèmes de préchauffage de l'air

L'échangeur de chaleur que nous allons dimensionner jouera le rôle clé pour la récupération de chaleur, en permettant de diminuer la température des fumées de 494°C jusqu'à 200 °C.

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

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

L'implantation d'un système de préchauffage augmente la température de la zone de convection et de radiation, et pour éviter une éventuelle surchauffe des tubes, les supports et d'autres accessoires, il faut prendre en considération tout cela lors de la conception.

## II. Les principaux types d'échangeurs de chaleur

### II.1. Echangeurs tubulaires

Les échangeurs tubulaires représentent encore près de la moitié des échangeurs thermiques vendus en France et en Europe. Ils présentent un certain nombre d'avantages : en particulier ils sont faciles à fabriquer, relativement bon marché, de maintenance aisée et surtout ils peuvent être utilisés à des pressions élevées et à de fortes températures. Leur robustesse et leur fiabilité compensent leur encombrement.

Différentes catégories existent suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée :

- **échangeur monotube**, dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpent ;
- **échangeur coaxial**, dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur ;
- **échangeur multitubulaire**, existant sous quatre formes :

*Echangeur à tubes séparés* : à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant (de l'ordre de 100 mm) se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre (8 à 20 mm) maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé ;

*Echangeur à tubes rapprochés* : pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans ;

*Echangeur à tubes ailetés* : ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique ;

*Echangeur à tubes et calandre.*

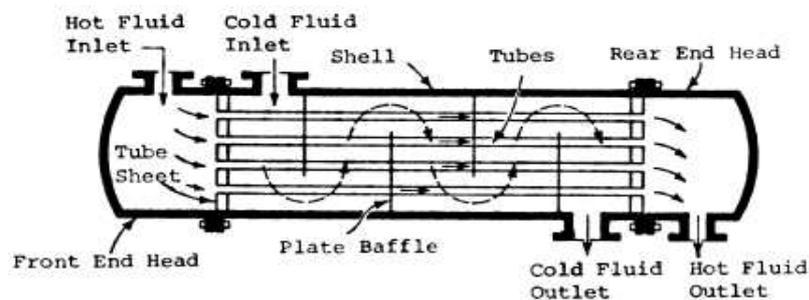


Figure 10: Echangeur tubulaire

## II.2. Echangeurs à plaques

L'échangeur à plaques est un type d'échangeur de chaleur qui connaît un usage croissant dans l'industrie. Il est composé d'un grand nombre de plaques cannelées superposées et séparées les unes des autres par des joints.

Les avantages de ce type d'échangeur résident en sa simplicité, c'est un échangeur peu coûteux et facilement adaptable par ajout/retrait de plaques afin d'augmenter/réduire la surface d'échange en fonction des besoins.

La différence de températures entre les 2 fluides ne doit pas être trop grande également pour éviter une déformation des plaques par dilatation/contraction de ces dernières qui empêcherait les joints entre les plaques d'être parfaitement étanches.

La turbulence permet de réduire l'encrassement de la surface d'échange de 10-25% par rapport à un échangeur à faisceau tubulaire. Comparativement à un échangeur à faisceau tubulaire la surface d'échange est inférieure de 50% pour le même transfert de chaleur.

Ces échangeurs sont préconisés surtout pour les fluides non visqueux.

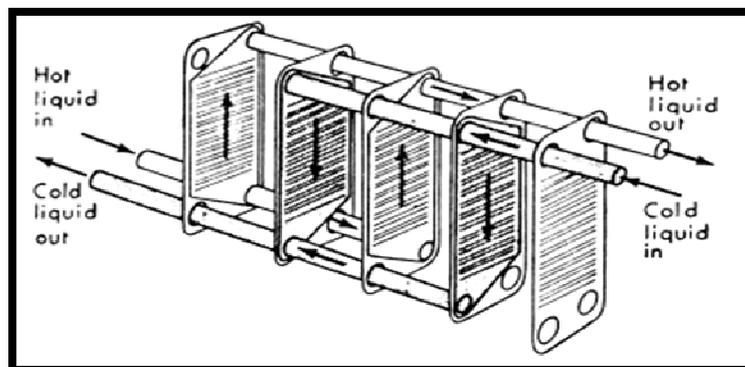


Figure 11: Schéma d'un échangeur à plaques



### III. Types des systèmes de préchauffage de l'air

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

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

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

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

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

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



#### IV. Choix du type de l'échangeur de chaleur

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

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

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

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

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

- Fuite d'air vers les fumées au niveau des joints d'étanchéité.
- Risque d'incendie par inflammation des dépôts.
- Conduite plus délicate.
- Intéressants pour les fours de puissances thermiques importantes supérieurs à 50000 T/h<sup>[4]</sup>.

Pour le secteur pétrolier, le type le plus répondu est l'échangeur récupérateur statique à plaques, considérant la sécurité d'exploitation et le rendement.

L'échangeur de chaleur peut être implanté dans l'installation de préchauffage selon trois alternatives<sup>[1]</sup> :

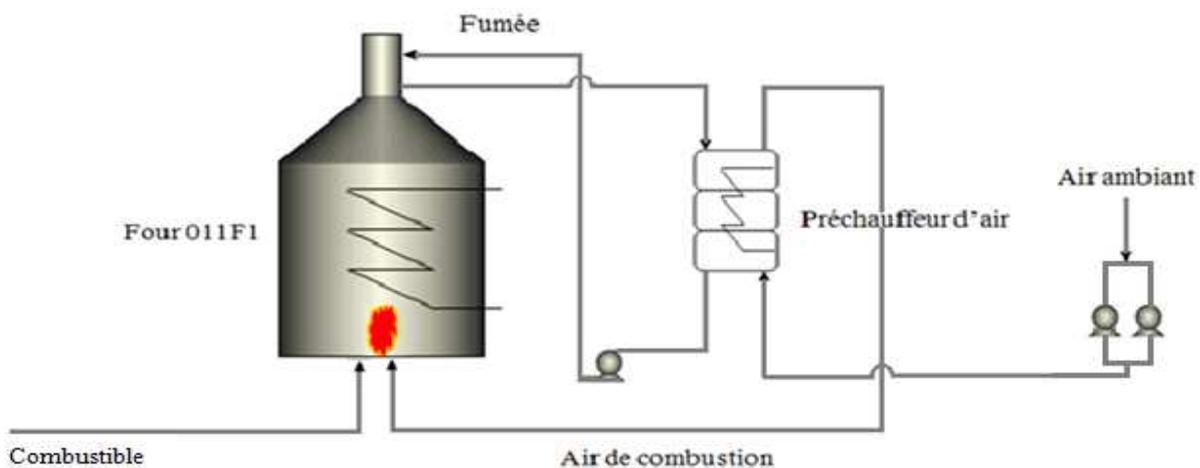
- Système direct de préchauffage de l'air.
- Système indirect de préchauffage de l'air.

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

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

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

Dans notre cas on optera pour le système direct qui est le moins encombrant et surtout le plus répondu et convenable pour les types de fours installés à La SAMIR.



de l'installation de préchauffage.



- Opérabilité du four avec une induction naturelle.
- La surface disponible pour l'installation du système.
- Les températures de conception des fumées.
- La possibilité de nettoyage de l'échangeur avec le minimum d'impact sur la bonne marche du four.
- L'effet négatif des fuites d'air dans le courant des fumées : corrosion, perte de charge, réduction du flux de l'air de combustion.
- La possibilité de produire un flux de radiation à travers la disposition des brûleurs.
- Méthodes possibles pour abaisser la température de rosée sulfurique.
- La contrôlabilité du système et degré de l'automatisation.
- La faisabilité d'étendre l'insensibilité du système de récupération.

## VI. Paramètres de marche de la combustion

L'interaction du four avec le système de préchauffage influe sur les paramètres de conception du four. Dans notre cas où le four existe déjà, on doit conserver la même chaleur absorbée. Donc une révision des paramètres de marche est prévue pour tenir compte des nouvelles conditions <sup>[7]</sup>.

## VII. Ajustement de l'excès de l'air

L'une des considérations importantes pour maximiser le rendement d'un four est le contrôle du flux d'air de combustion et le maintien de cet excès à sa valeur nominale assurant ainsi une combustion complète, stable et des flammes bien définies. Typiquement, un four muni d'un système de préchauffage à tirage équilibré opère à un excès d'air réduit de 10 à 15% par rapport à un système à induction naturelle. Ceci est dû au contrôle avancé et à l'instrumentation <sup>[1]</sup>.

## VIII. Fonctionnement en mode naturel

Pour des raisons économiques, la solution alternative de produire la dépression naturelle est à prendre en considération lors d'une défaillance d'un ventilateur ou de l'échangeur de chaleur.



La plupart des systèmes de préchauffage de l'air ont des registres et des isolations dans leurs systèmes de tuyauterie pour isoler le système de préchauffage en le dotant de la possibilité d'introduire naturellement l'air grâce à la dépression naturelle. Pour le côté fumée, un système de by-pass est à prévoir pour canaliser les fumées directement vers la cheminée. Une autre pratique très utilisée est d'augmenter la fiabilité du système en installant deux ventilateurs pour la redondance.

### **IX. Contrôle de la température froide des fumées**

Pour ne pas limiter la durée de vie normale du récupérateur de chaleur, il est très important d'avoir la possibilité de maintenir la température finale des fumées refroidies au dessus de la température de rosée de l'acide sulfurique durant toutes les conditions d'exploitation, même si les conditions de conception n'impliquent pas la nécessité d'un système de contrôle<sup>[7]</sup>.

On cite ici quelques cas d'exploitation qui requièrent un contrôle de température :

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

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

### **X. Dimensionnement de l'échangeur de chaleur**

L'espace nécessaire pour l'implémentation est fonction du type du système. Le système à tirage équilibré avec une structure d'échangeur indépendante requiert l'espace maximal. Mais grâce à la possibilité d'isoler l'échangeur et les ventilateurs, ce système demeure le plus flexible en termes d'exploitation et de maintenance. Pour les autres types de préchauffage, qui ont simplement soit l'induction forcée soit le tirage forcé, ils requièrent moins d'espace mais au détriment de la flexibilité du système. Comme le four 011F1 a un rôle primordial dans l'unité du Topping2, aucune tolérance n'est acceptée. Alors, on optera pour le système le plus flexible.



## XI. Considérations pour les fuites d'air dans les fumées

Les fuites d'air (les infiltrations) dans le courant des fumées à basse pression est un problème potentiel dans la plupart des échangeurs de préchauffage de l'air. Pourtant, la plupart des constructeurs assure des fuites d'air inférieur à 1% pour les échangeurs de récupération à plaque. Pour les récupérations régénératifs dynamiques, les fuites s'élève à 10% voire 20% si le système n'est pas bien maintenu.

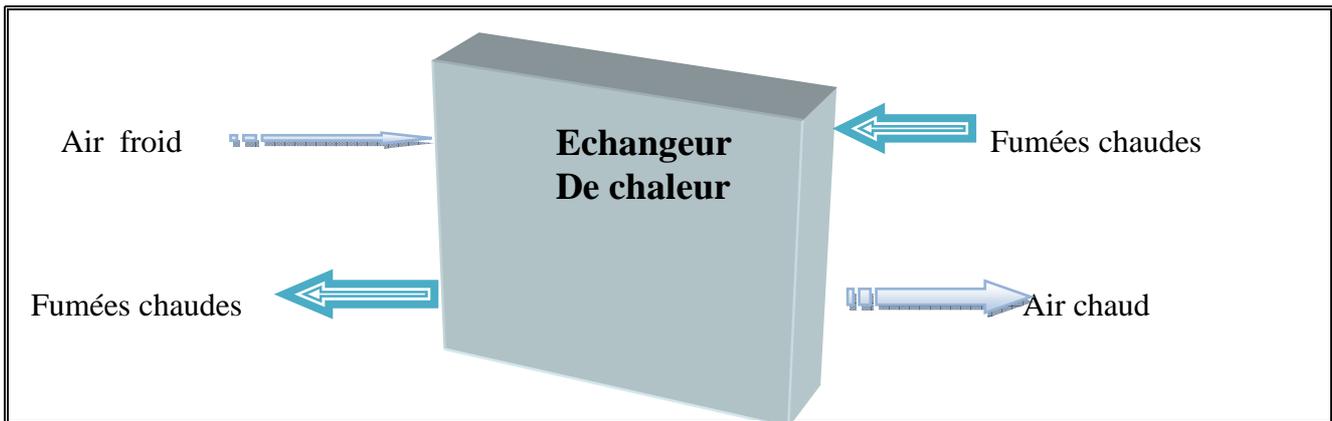
Les effets majeurs des fuites sont :

- La diminution du flux de l'air de combustion, donc on doit justifier le surdimensionnement du ventilateur d'induction forcée.
- L'augmentation du débit des fumées : alors on aura des nouvelles contraintes défavorables pour le ventilateur du tirage forcé qui est censé maintenir la dépression approprié dans le four.
- La nécessité du contrôle de la température des fumées refroidi pour éviter la condensation.

Plusieurs critères sont à considérer pour le dimensionnement d'un échangeur suivant son utilisation.

Deux types de calcul thermique sont envisageables pour la caractérisation de l'échangeur :

- La détermination des températures de sortie des fluides, connaissant leurs températures d'entrée.
- La détermination de la surface d'échange  $S$  connaissant la puissance échangée et les températures d'entrée et de sortie des deux fluides.



### I. Méthode DE DTML <sup>[8]</sup>

La valeur locale de la puissance élémentaire  $d\Phi$  échangée à travers un élément de surface  $dS$  est donnée par l'équation :

$$d\Phi = k(T_1 - T_2) dS$$

Avec  $K$  coefficient d'échange global,  $T_1$  et  $T_2$  températures des fluides  $F_1$  et  $F_2$  de part et d'autre de la paroi.

La surface d'échange totale s'obtient en intégrant l'équation précédente :



$$S = \int \frac{d\Phi}{k(T_1 - T_2)}$$

L'intégration ne peut s'effectuer que pas à pas si l'on connaît l'évolution du coefficient d'échange  $K$  en fonction des températures  $T_1$  et  $T_2$ , dont l'évolution suivant l'écoulement doit elle-même être connue.

Globalement, la surface d'échange ne peut être calculée qu'en admettant les hypothèses suivantes :

- On définit une température moyenne caractéristique ;
- On suppose constant le coefficient d'échange global  $K$  déterminé à la température caractéristique d'échange.

La surface s'obtient par la relation :

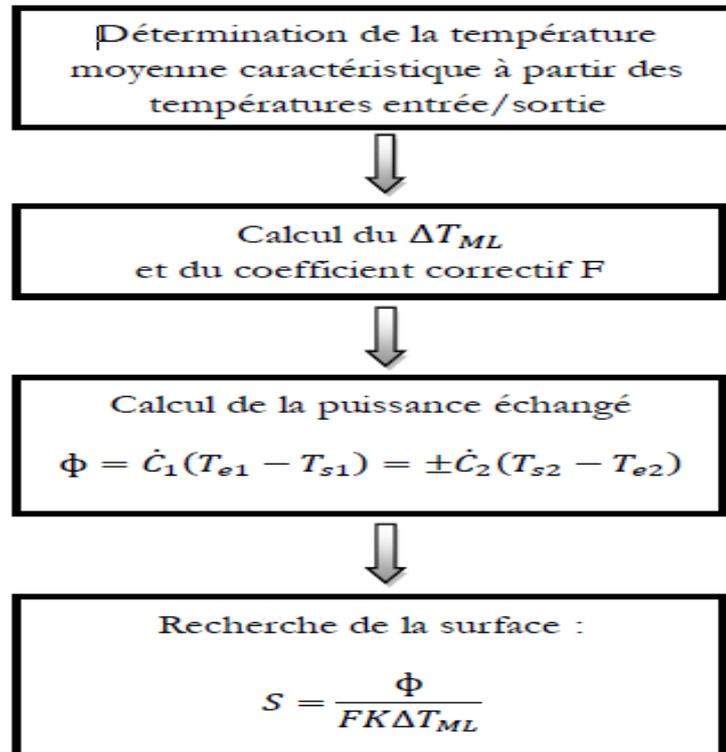
$$S = \frac{\Phi}{K\Delta T_{12}} = \frac{\Phi}{FK\Delta T_{ML}}$$

Avec  $\Delta T_{ML}$  différence moyenne de température entre les deux fluides sur tout l'échangeur.

Logarithmique Dans la pratique, on préfère exprimer cette différence moyenne à partir de la différence moyenne d'un échangeur à contre-courant calculée avec les mêmes températures d'entrée et de sortie des fluides, multipliée par un facteur correctif  $F$ .

Ce facteur correctif  $F$  vaut 1 dans le cas d'un échangeur à contre-courant. Dans certains cas, la solution est analytique mais la formule est complexe, et dépend de l'efficacité  $\epsilon$ . Dans la pratique, on a recours à des abaques pour le calcul de  $F$  et l'on peut se reporter à l'ouvrage de Kern pour la classification suivant les différents modes de circulation ( multipasses, courants croisés, etc.).

- Le déroulement du calcul peut être schématiquement le suivant :



Avec  $\dot{C}_1$  et  $\dot{C}_2$  débits de capacités des deux fluides.

### I.1. Détermination de $\Delta T_{ML}$

$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_{e \text{ fumées}} - T_{s \text{ air}}) - (T_{s \text{ fumées}} - T_{e \text{ air}})}{\ln \frac{(T_{e \text{ fumées}} - T_{s \text{ air}})}{(T_{s \text{ fumées}} - T_{e \text{ air}})}}$$

### I.2. Calcul de $\Delta T_{ML}$

$$\Phi = D_{\text{fumées}} \cdot C_{p \text{ fumées}} (T_{e \text{ fumées}} - T_{s \text{ air}}) = D_{\text{air}} \cdot C_{p \text{ air}} (T_{s \text{ air}} - T_{e \text{ air}})$$

✓ Données :

Chaleur spécifique ( $C_p$  fumées)= 1049,048 J/Kg.K (Annexe I)

Chaleur spécifique ( $C_p$  air)= 1030,854 J/Kg.K

Température de sortie des fumées( $T_s$  fumées)=473 K

Température d'entrée des fumées( $T_e$  fumées)=767 K



Température d'entrée d'air ( $T_{e \text{ air}}$ )=294 K

Débit (D fumées)= 40678,52Kg/h

Débit (D air)=31570 Kg/h

**Remarque :** Les valeurs des débits et des températures sont prises depuis la salle du contrôle de Topping 2 et celle de Cp est obtenu d'après data sheet de l'unité 011.

✓ Calcul :

$$T_{s \text{ air}} = 679,51\text{K}$$

Et :

$$\Delta T_{ML} = 400,84\text{K}$$

### I.3 Calcul de F

F est le **facteur de correction** de la température qui est en fonction de :

$$R = \frac{(T_{e \text{ fumées}} - T_{s \text{ fumées}})}{(T_{s \text{ air}} - T_{e \text{ air}})}$$

ET :

$$P = \frac{(T_{s \text{ air}} - T_{e \text{ air}})}{(T_{e \text{ fumées}} - T_{s \text{ air}})}$$

D'après l'abaque (**Annexe II**) ou la formule, la valeur de facteur de puissance correspondante à  $R = 0.76$  et  $P = 0.71$

$$F = \frac{\frac{\sqrt{R^2 + 1}}{R - 1} \log_{10} \frac{1 - P}{1 - RP}}{\log_{10} \frac{\frac{2}{P} - 1 - R + \sqrt{R^2 + 1}}{\frac{2}{P} - 1 - R - \sqrt{R^2 + 1}}}}$$

$$F = 0,98$$



#### I.4. Calcul de la surface d'échange S

L'expression de la surface d'échange est donné par :

$$S = \frac{\Phi}{FK \Delta T_{ML}}$$

✓ **Données :**

$\Phi$  est le flux échangé en se référant aux fumées chaudes. Le flux est donné par :

$$\Phi = D_{fumées} \cdot C_{p\ fumées} (T_{e\ fumées} - T_{s\ fumées}) = 12555641 \text{ KJ/h}$$

Choix de la valeur du coefficient d'échange globale K, d'après les ordres de grandeurs présentés dans le tableau suivant :

Fluide chaud	Fluide froid	K(Kcal/h.m <sup>2</sup> .°C)
Gaz	Gaz	10-50
Gaz	Liquide visqueux	20-50
Gaz	Liquide peu visqueux	20-80
Liquide visqueux	Gaz	20-50
Liquide peu visqueux	Gaz	20-80
Liquide visqueux	Liquide visqueux	100-200
Liquide visqueux	Liquide peu visqueux	100-300
Liquide peu visqueux	Liquide peu visqueux	700-1800
Vapeur	Liquide visqueux	200-400
Vapeur	Liquide peu visqueux	1000-2000
Vapeur	Liquide en ébullition	700-1500

**Tableau 3: Choix du coefficient d'échange K**

➤ Dans notre cas il s'agit de deux fluides gazeux (air, fumées).

D'où :

<b>K</b>	10	20	30	40	50
----------	----	----	----	----	----



(Kcal/h.m <sup>2</sup> .°C)					
Surface (m <sup>2</sup> )	3196,25	1598,12	1065,41	799,06	639,25

Tableau 4: Calcul de la surface pour les deux fluides (air, fumées)

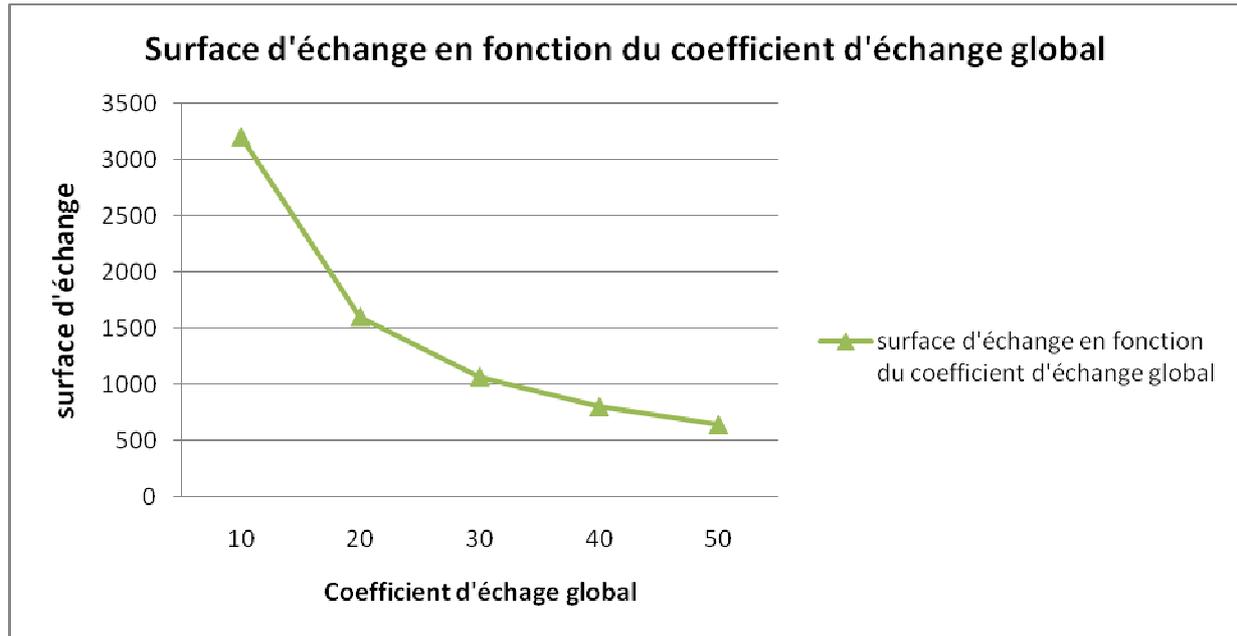


Figure 13: Surface de l'échange en fonction du coefficient d'échange global

- On remarque que la surface d'échange diminue quand le coefficient d'échange augmente, ce qu'est tout à fait normal.

Température d'entrée de la fumée (°C)	494
Température d'entrée de l'air (°C)	21



<b>Température de sortie de la fumée (°C)</b>	<b>200</b>
<b>Température de sortie de l'air (°C)</b>	<b>406,51</b>
<b><math>\Delta T_{ML}</math> différence moyenne de température entre les deux fluides (°C)</b>	<b>127,84</b>
<b>Flux échangé (KJ/h)</b>	<b>12555641</b>
<b>Coefficient d'échange global (kcal/h m<sup>2</sup> C)</b>	<b>50</b>
<b>Surface d'échange (m<sup>2</sup>)</b>	<b>639,25</b>

**Tableau 5: Tableau récapitulatif**



## Chapitre VI : Dimensionnement des équipements auxiliaires



## I. Dimensionnement des ventilateurs

Pour compenser les pertes de charge dans le four, et assurer une combustion complète dans les conditions normales de fonctionnement; la conception des ventilateurs constitue une partie très importante dans le dimensionnement de l'installation de récupération de la chaleur.

Le ventilateur centrifuge est le choix le plus approprié pour le cas des installations de récupération de chaleur à tirage forcé.

Le choix d'un ventilateur centrifuge se fait au sein d'une sélection de taille standard selon les besoins aérodynamiques, puis le ventilateur choisi est adapté mécaniquement aux exigences de l'installation.

Si le ventilateur n'est pas correctement adapté aux conditions, cela peut entraîner pour l'exploitation de l'installation une consommation d'énergie et une génération de bruit excessives, voire même des défaillances mécaniques, et de ce fait une perte de bénéfices significative.

Pour réussir un bon dimensionnement des ventilateurs qui vont assurer l'acheminement d'air et des fumées dans l'installation, il faut tenir en compte toutes les pertes et les erreurs de calcul qui peuvent être encourus lors de la phase de la conception.

### a.) Dimensionnement des ventilateurs de l'induction forcée

Le dimensionnement du ventilateur demande la détermination du débit massique qui correspond à la somme des débits suivants :

- L'air de combustion en mode d'exploitation maximal, 100% de la charge ;
- Les fuites d'air nominales dans l'échangeur de récupération de chaleur ;

Le débit d'air (**chapitre V**) reflète le besoin en air de combustion pour les conditions nominales. Pourtant, il est fortement recommandé de multiplier le débit calculé par un facteur de 115% <sup>[1]</sup>. Ce facteur tient compte de :

- Incertitudes dans le calcul de l'air de combustion ;
- Incertitude de la vapeur des fuites d'air dans l'échangeur ;
- Tolérance des courbes opératoires des ventilateurs ;



- Changement dans la composition du fioul ou dans l'excès d'air ;
- Petite tolérance dans les fuites imprévues d'air ;

### b.) Calcul de la hauteur manométrique des ventilateurs

Pour qu'on puisse avoir une combustion complète dans le four de chauffage, il faut compenser toutes les pertes de charge générées dans le système de récupération de la chaleur majorée de 10% à 15%.

Les pertes de charge se produisent généralement dans les zones suivants :

- L'échangeur air/Fumées ;
- Canalisations des fumées chaudes ;
- Entrée du ventilateur ;
- Canalisation des fumées refroidies entrantes dans la cheminée ;
- Les canalisations entre le ventilateur et l'échangeur.

La pression est calculée en élevant au carré le facteur de majoration de l'air de combustion  $(1,15)^2 = 1,30$ .

### C.) Calcul de la puissance du ventilateur

Pour calculer la puissance nécessaire assurant une bonne circulation des fluides dans l'installation, On détermine la pression en aval du ventilateur, en utilisant la loi de BERNOULLI selon l'équation suivante<sup>[10]</sup> :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + \Delta H_{perdue} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \Delta H_{ventilateur}$$

On suppose que :

$$Z_1 = Z_2 \text{ et } V_1 = V_2$$

$\Delta H_{perdue}$  : Perte de charge totale du circuit d'air.

$$\Delta H_{ventilateur} = \Delta H_{perdue} - \Delta P_{(T)}$$

- Dimensionnement du ventilateur d'air :

### Les pertes de charges



Les pertes de charge sont un problème récurrent de la mécanique des fluides surtout dans le domaine des transports de fluide. Physiquement, elles correspondent à une perte de pression dans une canalisation.

➤ **Les pertes linéaires :**

Les pertes de charge dites linéaires qui intervient dans toutes les canalisations à cause de la présence de paroi. On note la perte de charge  $\Delta P_l$ .

On peut calculer ces pertes en utilisant des formules connues ou des abaques de pertes de charges (**Annexe V**).

**Formule de Darcy-Weisbach :**

Perte de pression linéaire dans le cas d'un conduit circulaire <sup>[11]</sup>:

$$\Delta P_l = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho}{2} V^2 \quad [\text{Pa}]$$

$\lambda$  : Coefficient de frottement de Darcy [-] ;

L : Longueur du conduit [m] L= 12m ;

D : Diamètre intérieur du conduit [m] ;

$\rho$  : Masse volumique de l'air [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] ;  $\rho = 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$  ; (**Annexe III**)

V : Vitesse moyenne de l'air [m/s] ;

Pour effectuer ce calcul on doit suivre les étapes suivantes :

- Déterminer La vitesse Maximal en fonction du débit (**Annexe IV**)
- Calculer le diamètre de la canalisation
- Calculer le nombre de Reynolds
- Déterminer la viscosité relative du conduit (**Annexe III**)
- Calculer le coefficient de frottement de Darcy
  
- Calculer la perte de pression linéique



Ta  
ble  
au  
6:  
For  
mu  
les  
util  
isée  
s  
pou  
r le  
cal  
cul  
des

Grandeur	Formule Utilisée	
La vitesse moyenne de l'air $D$ [m/s]	-	7
Le débit d'air $q_v$ [ $m^3/h$ ]	-	26308,3
Le débit d'air $q_v$ [ $m^3/s$ ]	$q_v [m^3/h] = q_v [m^3/h] / 3600$	7,3
Diamètre de la conduite [m]	$D = \sqrt{\frac{4 \cdot q_v}{\pi \cdot v}}$	1,15
Viscosité cinématique $\gamma$ [ $m^2/s$ ]	-	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Nombre de Reynolds $Re$ [-]	$Re = \frac{v \cdot d}{\gamma}$	$5,36 \cdot 10^5$
Coefficient de frottement de Darcy $\lambda$ [-]	$\frac{1}{\lambda 2} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} \right)$	0,98
la perte de charge linéaire [ $mmH_2O$ ]	$\Delta P_l = \lambda \frac{L \rho}{D 2} V^2$	30

pertes linéaires (ventilateur d'air).

✓ Calcul :

- Diamètre de la conduite :

$$q_v = v \cdot s = v \cdot \frac{\pi D^2}{4}$$

Avec : Le débit d'air

Débit massique :  $q_v = 31570 \text{ Kg/h}$  , débit volumique :  $q_m = 26308 \text{ m}^3/\text{h}$ ;

**$D = 1,15\text{m}$ ;**

- Nombre de Reynolds ( $Re$ ) =  $\frac{v \cdot d}{\gamma} = 5,36 \cdot 10^5$ ;

Avec : la rugosité relative  $\gamma = 1,5 \cdot 10^{-5}$

- Coefficient de frottement de Darcy  $\lambda = -2 \log \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d}$  ;

Avec rugosité absolue de la paroi interne du conduit  $\varepsilon = 1,3$

**$\lambda = 0,98$**



- les pertes de pression linéaire :

$$\Delta P_l = 30 \text{ mmH}_2\text{O}$$

Soit :  $1 \text{ Pa} = 0,1 \text{ mmH}_2\text{O}$

Le millimètre d'eau ( $\text{mmH}_2\text{O}$ ) est défini comme la pression exercée à la base d'une colonne d'eau exactement de 1 millimètre (mm) de hauteur, et la densité du fluide est exactement 1,004514556 gramme par centimètre cube ( $\text{g} / \text{cm}^3$ ), dans un emplacement physique où l'accélération de la pesanteur est exactement  $9,80665 \text{ m} / \text{s}^2$  [12].

### ➤ Les pertes singulières

Les pertes de charge singulière qui interviennent lors d'un changement de géométrie de la canalisation réf [7].

$$\Delta P_s = \zeta \frac{\rho}{2} V^2 \quad [\text{Pa}]$$

$\Delta P_s$  : Perte de pression singulière [Pa] ;

$\zeta$  : Coefficient de perte de pression singulière de l'élément considéré [-]  $\zeta = 0,3$  ;

$\rho$  : Masse volumique de l'air [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  $\rho = 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$  ;

$V$  : Vitesse Maximal [ $\text{m}/\text{s}$ ]  $V = 7 \text{ m}/\text{s}$ ;

$$\Delta P_s = 0,88 \text{ mmH}_2\text{O}$$

### ➤ Les pertes par l'échangeur de chaleur :

Les pertes au sein de l'échangeur sont évaluées par le constructeur de l'échangeur « RIZZI ENGINEERING ».

$$\Delta P_1 = 107 \text{ mmH}_2\text{O}$$

### ➤ Les pertes dans le bruleur du four :

$$\Delta P_b = 65 \text{ mmH}_2\text{O}$$

### ➤ La dépression due à la différence de température :



$$\Delta P(T) = 16,2 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$\begin{aligned}\Delta H_{\text{ventilateur}} &= \Delta H_{\text{perdue}} - \Delta P_{(T)} \\ \Delta H_{\text{ventilateur}} &= 1,3 * (\Delta P_l + \Delta P_s + \Delta P_1 + \Delta P_b) - \Delta P_{(T)} \\ \Delta H_{\text{ventilateur}} &= 1,3 * (30 + 0,88 + 107 + 65 - 16,5) \\ \Delta H_{\text{ventilateur}} &= 242,29 \text{ mmH}_2\text{O} \\ \Delta H_{\text{ventilateur}} &= 0,24 \text{ mH}_2\text{O}\end{aligned}$$

La puissance du ventilateur d'air est donné par :

$$p = 1,15 * g * \Delta H_{\text{ventilateur}} * D_{\text{air}}$$

Ou  $D_{\text{air}}$  est le débit massique d'air de combustion.

La puissance utile du ventilateur est donnée par :

$$p = 85,39 \text{ KW}$$

Sachant que le rendement du moteur :

$$\eta = \frac{\text{la puissance absorbée}}{\text{la puissance utile}} = 90\%$$

La puissance absorbé par l'arbre est de :

$$p = 76,85 \text{ KW}$$

## II. Dimensionnement de l'extracteur des fumées



➤ Les pertes linéaires

Grandeur	Formule Utilisée	
Vitesse maximal da la fumée [m/s]	-	7
Le débit d'air $q_v$ [ $m^3/h$ ]	-	27118,6
Le débit d'air $q_v$ [ $m^3/s$ ]	$q_v [m^3/h] = q_v [m^3/h] / 3600$	7,53
Diamètre de la conduite de la fumée [m]	$D = \sqrt{\frac{4 \cdot q_v}{\pi \cdot v}}$	1,17
Viscosité cinématique $\gamma$ [ $m^2/s$ ]	-	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Nombre de Reynolds $Re$ [-]	$Re = \frac{v \cdot d}{\gamma}$	$5,46 \cdot 10^5$
Coefficient de frottement de Darcy $\lambda$ [-]	$\frac{1}{\lambda 2} = -2 \log\left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D}\right)$	0,98
la perte de charge linéaire [ $mmH_2O$ ]	$\Delta P_l = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho}{2} v^2$	<b>46,17</b>

Table  
au 7 :  
Form  
ules  
utilisé  
es  
pour  
le  
calcul  
e des  
pertes  
linéair

es ( extracteur des fumées)

Avec :

- Longueur du conduit [m] :  $L=15m$  ;
- Masse volumique de la fumée [ $kg/m^3$ ] :  $\rho= 1,5 kg/m^3$  ;

$$\Delta P_l = 46,17 \text{ mmH}_2\text{O}$$

➤ Les pertes singulières :

$$\Delta P_s = 1,1 \text{ mmH}_2\text{O}$$

➤ Les pertes par l'échangeur de chaleur :

$$\Delta P_1 = 105 \text{ mmH}_2\text{O}$$

➤ La dépression due à la différence de température :



$$\Delta P_1 = 17 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$\Delta H_{\text{ventilateur}} = \Delta H_{\text{perdue}} - \Delta P_{(T)}$$

$$\Delta H_{\text{ventilateur}} = 1,3 * (46,17 + 1,1 + 105 - 17)$$

$$\Delta H_{\text{ventilateur}} = 180,42 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$\Delta H_{\text{ventilateur}} = 0,18 \text{ mH}_2\text{O}$$

La puissance du ventilateur d'air est donné par :

$$p = 1,15 * g * \Delta H_{\text{ventilateur}} * D_{\text{fumée}}$$

Ou  $D_{\text{fumée}}$  est le débit massique de la fumée.

La puissance utile du ventilateur est donnée par

$$p = 82,51 \text{ KW}$$

Sachant que le rendement du moteur est de 90%, La puissance absorbé par l'arbre est de :

$$p = 74,25 \text{ KW}$$

### III. Dimensionnement des bruleurs

Le brûleur est l'organe essentiel du four qui permet le contrôle de la chaleur fournie, et donc pour éviter tout gaspillage éventuel d'énergie thermique. Il faut se concentrer sur trois axes principaux lors du dimensionnement des brûleurs :

- Le brûleur doit être muni d'une source d'inflammabilité stable et renouvelable ;
- Le brûleur doit contrôler le mélange des réactifs, le combustible et l'agent oxydant ;
- Le brûleur doit être conçu pour une région de réaction contrôlable, c'est-à-dire la forme de la flamme doit être contrôlée pour une propagation uniforme d'énergie.

L'amélioration des procédés industriels ainsi que les différentes machines thermiques a permis de contribuer au perfectionnement des brûleurs qui doivent garantir une exploitation stable. En plus, on ne doit pas dépasser les limites maximales des émissions polluantes engendrées lors du processus de la combustion.



On peut classer les brûleurs en deux catégories selon la pression d'air à l'admission :

- L'air à une pression négative (induction naturelle).
- L'air à une pression positive (induction forcée).

Pour notre cas, l'utilisation d'un système de préchauffage nécessite l'option de l'induction forcée, alors que les brûleurs installés dans le four 011F1 est du type induction naturelle.

Le four 011F1 est muni de 9 brûleurs, la chaleur dégagée par chaque brûleur est de l'ordre de  $1,47 \cdot 10^6$  Kcal/h.

Le constructeur fournit une courbe qui informe sur la taille du brûleur en fonction des pertes de charge et de la chaleur libérée. Les brûleurs sont paramétrés sur une fourchette de chaleur libérée suivant les normes de chaque constructeur.

Pour le four 011F1 :

- La chaleur dégagée par chaque brûleur est de  **$1,4710^6$  Kcal/h.**
- L'excès d'air de design du four est de **30%**.
- La température d'entrée d'air devient  **$406,51^\circ\text{C}$**  avec la nouvelle configuration.

Les pertes de charge de l'air à l'entrée des brûleurs sont en fonction de la chaleur libérée, pour satisfaire à toutes les conditions d'exploitation, on considère les pertes au cas le plus défavorable.

Pour le cas des brûleurs à induction forcée les pertes de charge sont de l'ordre de  **$65\text{mmH}_2\text{O}$**  [7].

#### IV. Calorifugeage

Le but de l'installation dimensionnée est de minimiser les pertes de chaleur qui se produisent au niveau du four pour augmenter le rendement. Or, dans l'installation on peut avoir des pertes thermiques importantes, au niveau des conduites.

Pour que le système puisse opérer avec des pertes de chaleur acceptables, il faut modéliser le phénomène de transfert de chaleur. On peut proposer, pour réduire les pertes d'énergie dans l'installation de la récupération de chaleur un système de calorifugeage.

Pour la canalisation, on peut distinguer deux types de calorifugeage :

##### a) Calorifugeage des conduites d'air :



---

Les conduites de l'air sont en acier ordinaire de conductivité thermique  $46,39 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ .

On utilisera comme matière de calorifugeage la laine de verre avec une conductivité thermique très faible de  $0,04 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  et une épaisseur de 10mm.

**b) Calorifugeage des conduites des fumées :**

Les conduites de l'air sont aussi en acier ordinaire de conductivité thermique  $46,39 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ .

Pour l'isolation des conduites des fumées on utilise le béton réfractaire sa conductivité thermique est de  $0,10 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  et avec une épaisseur de 18mm.



## Chapitre VII : Régulation du Four 011F1



## I .But de régulation

L'étude de régulation du Four à un rôle primordial pour :

- Protéger l'environnement ;
- Augmenter le rendement du four ;
- Eviter l'encrassement des équipements intérieur du Four ;

Le problème majeur réside à éviter la pollution. En effet, le four éjecte de la fumée noire si le débit de combustible est grand par rapport au débit de l'air, et aussi éjecte de la fumée blanche dans le cas inverse.

De plus la fumée noire éjectée par le four crée une couche solide qui sulfurise les tubes de ce dernier, ce qui rend le chauffage des produits difficile et prend plus de temps, ceci influence le rendement et la fiabilité.

A cela s'ajoute le problème de pouvoir calorifique de fuel gaz, on sait bien que le fuel gaz dont le pouvoir calorifique est variable, alors que le chauffage de ce dernier est instable.

Et en termes de sécurité à ce niveau on remarque qu'on n'a pas la main de réagir sur la pression en aval des combustibles, ce qui réagit d'une façon mauvaise sur la pression intérieure du four, ceci pourra entraîner les employés dans des dangers fatales.

## II .Outils utilisés

Le système de contrôle commande intégré utilisé à la raffinerie SAMIR, est conçu par la société YOKOGAWA. Il s'adresse aux applications moyennes ou importantes, et destiné à la gestion et au contrôle dans différents domaines industriels : raffinage, pétrochimie, pharmacie, industries alimentaires, pâtes et papiers, aciers et métaux non ferreux, ciment, énergie, gaz, eau et eaux usées.



YOKOGAWA a conçu ce qu'on appelle le Système de Contrôle Intégré (ICS). Il intègre les dernières technologies, sur une architecture ouverte, modulaire. Cette architecture est utilisée essentiellement dans le domaine industriel pour assurer la supervision et la surveillance d'installation technique, comme :

- Supervision de production pétrolière ou gazière
- Gestion de stockage
- Supervision de production
- Gestion de trafic
- Supervision de distribution et de traitement d'eau
- Supervision et gestion de l'énergie
- Supervision des sites...

Le point fort de ce système est qu'il ne permet pas la séparation entre la partie régulation du procédé et la sécurité de l'ensemble du système.

Ce système est constitué de deux niveaux, niveau de supervision et niveau contrôle-commande.

## II.1 Niveau de supervision

A ce niveau, on trouve le HIS (Poste Opérateur) et le EWS (Poste Ingénieur) qui est destiné à la configuration du système avec le logiciel Centum CS3000.

Le système CS3000 est un Système Numérique de Contrôle et de Commande (SNCC) distribué, souple. Il concrétise le concept de solutions intégrées destiné à la gestion et au contrôle des moyennes et grandes applications industrielles.

Les principes de base du système CS3000 sont :



- Performance d'un vrai système numérique de contrôle commande (SNCC) de PC : le système Centum CS3000 associe la souplesse et la fiabilité de ses prédécesseurs

de la famille Centum. Doté d'une architecture souple, il est conçu pour s'adapter aux systèmes déjà implantés.

- un système ouvert, construit autour de Windows 2000 : Organisé autour du système d'exploitation Windows 2000, le Centum CS3000 offre un environnement ouvert et un accès facile à toutes les données du procédé.
- Accès aux autres applications de Windows 2000 : la visualisation des fenêtres d'exploitation n'empêche pas l'accès simultané à toutes données du procédé.

## II.2 Niveau de contrôle- commande

La partie contrôle est divisée en trois sous-systèmes: le ESD, DCS et le FGS. Chaque système a un rôle bien déterminé :

### II.2.1 Système de contrôle distribue (DCS)

C'est le niveau où le traitement des données se fait suivant des algorithmes de régulation et de contrôle séquentiel programmés et stockés dans des unités de traitement appelés FCU (Field Control Unit) qui sont reliées entre elles via le bus de communication Vnet. L'ensemble des FCU et Nœuds constituent la station de contrôle FCS (Field Control System), alors c'est quoi FCS ?

FCS réalise des fonctions de contrôle continu ou séquentiel ainsi que des fonctions programmables par l'utilisateur avec un temps de cycle configurable 200 ms, 500 ms ou 1s. Il réalise les fonctions suivantes :

- Fonction de contrôle : telles que les fonctions de régulation, de calcul et de contrôle séquentiel.
- Intégration des sous-systèmes : possibilité d'intégration des sous-systèmes en utilisant les interfaces standards (RS-232 et RS-485) et des logiciels de communications compatibles avec les sous-systèmes des principaux fabricants.
- Liaison avec l'instrumentation : possibilité de communiquer avec les instruments de terrain en utilisant soit des modules d'entrées/Sorties déportés, soit un bus de terrain.



### II.2.2 L'automate de sécurité (ESD)

L'ESD est un système automatisé qui intègre un très grand niveau de sécurité. Il est traditionnellement utilisé dans les zones présentant un haut niveau de risque.

Ce type de systèmes est à base d'automates de sécurité Prosafe ayant un temps cycle très rapide afin de détecter toutes les anomalies apparaissant durant le fonctionnement et de pouvoir réagir en temps réel. Il est conçu principalement pour la gestion des sécurités et des arrêts d'urgence ainsi que les séquences de démarrage.

PROSAFE est le diminutif de « programmable safety systems » qui comprend une gamme complète de produits dédiés aux fonctions de sécurité tant pour les fonctions d'arrêt d'urgence que pour les fonctions de protection contre le feu et le gaz.

### II.2.3 Système de détection feu et gaz (FGS)

Le FGS est un système de détection de feu et de gaz à base d'un système d'alarme. Pour assurer ces fonctions, il est nécessaire d'utiliser des automates de sécurité à scrutation rapide comme les automates Prosafe APACS+.

Ce système permet les fonctions suivantes :

- Détection des Hydrocarbures.
- Détection des Hydrogènes.
- Détection de l'Acide Sulfurique H<sub>2</sub>S.
- Détection des fumées
- Détection de toutes sortes de gaz nuisible à la présence humaine.

## II.3. Les réseaux de communication

La société YOKOGAWA dispose d'un certain nombre de réseaux, comme Vnet, ce réseau est propriétaire à lui, ce qui facilite sa configuration et son intégration dans les systèmes automatisés, elle utilise aussi le réseau Ethernet (LAN) ainsi que le protocole HART pour communiquer entre capteurs et terrain. Alors qu'elles sont les caractéristiques de chacun ?



### II.3.1 Ethernet

L'Ethernet assure le dialogue horizontal entre les HIS, ainsi il lie les HIS aux autres équipements informatiques comme les imprimantes. Ce réseau est destiné à :

- Télécharger la base de données du projet depuis l'HIS-EWS dans les autres HIS.
- Echange des données historiques entre HIS.
- Permettre le partage de ressources (imprimante) entre HIS.

Ce bus assure la communication à une vitesse de 10 ou 100 Mbps (suivant les types de câbles).

La longueur maximale de transmission par câble coaxial entre deux répéteurs est 185m.

### II.3.2 Le réseau Vnet

Le réseau Vnet est un réseau de contrôle en temps réel reliant les stations de contrôles FCS entre elles et avec d'autres stations telles que les PC et les équipements de communication.

Le bus Vnet réalise des fonctions de communication à vitesse égale à 10Mbits /s en utilisant un système d'émission en diffusion un jeton tournant.

Le réseau Vnet est destinée à :

- Télécharger les configurations des FCS depuis les stations de configuration : EWS
- Echanger les données entre les FCS.
- Echanger les données entre les FCS et les stations de supervision HIS et de configuration EWS.

### II.3.3 L'architecture de base :

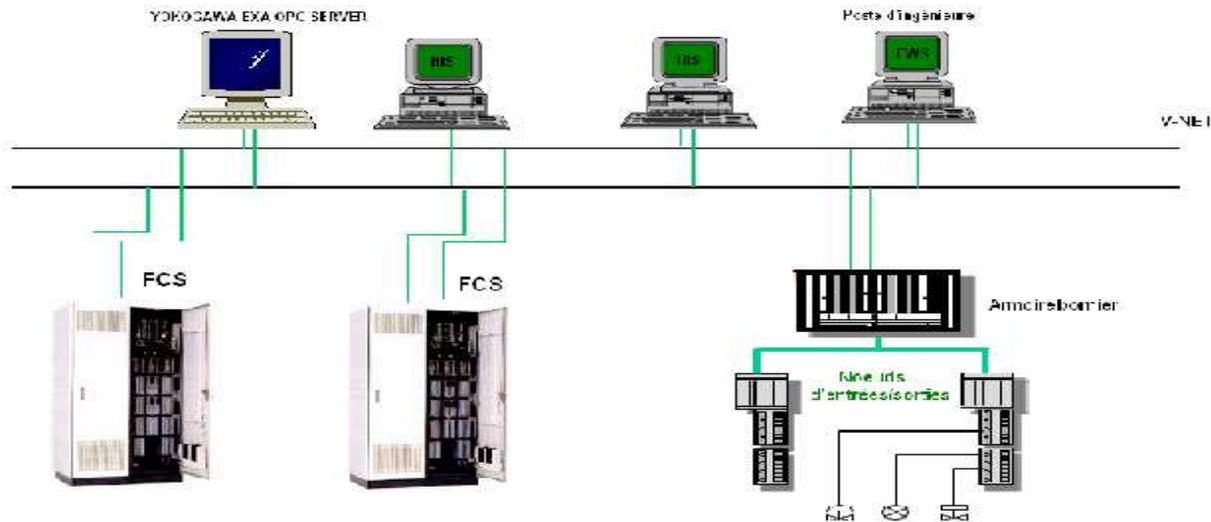


Figure 14 : Structure de liaison des différents composants de l'environnement YOKOGAWA.

## III. Description de la régulation

### III .1 Mode de fonctionnement

La charge (brut) entre dans le four 011F1 par 4 passes en parallèle, équipées de contrôle de débit. La charge portée à la température désirée entre dans la tour.

Les brûleurs multi-combustibles du four sont alimentés en :

- air comburant dont le débit est en kg/h (par tirage naturel).
- fuel gaz dont le débit massique est en kg/h.
- fuel oil dont le débit massique est en kg/h, est obtenu par différence entre le débit total entrant et le débit retour.

### III.2 Principe de fonctionnement de l'ancienne chaîne de régulation

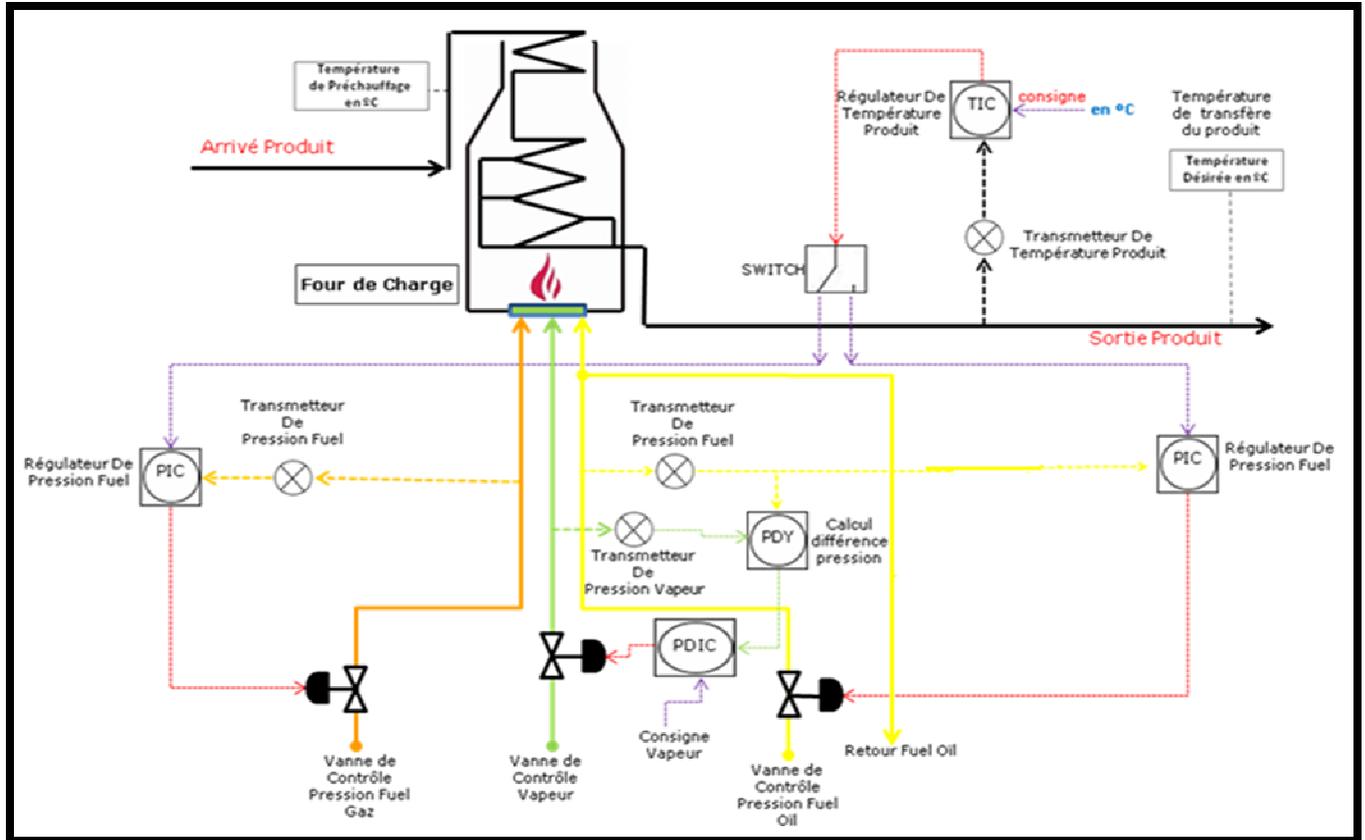


Figure 15 : Chaîne de régulation avec tirage naturel

Dans cette chaîne de régulation on mesure la température de produit à la sortie du four par un transmetteur de température (TT), et on la compare avec la consigne désirée par un régulateur de température (TIC) qui nous délivrera un signal de correction.

Ce signal de correction est envoyé comme consigne par l'intermédiaire d'un SWITCH au régulateur de pression (PIC) de fuel oil ou de fuel gaz.

En cas de sélection du PIC du fuel Gaz (régulateur de pression en cascade), il compare la consigne externe arrivée du régulateur TIC, avec la mesure qui est délivrée par un transmetteur de pression (PT), et calcule le signal de correction qui va commander l'ouverture de la vanne

a fin d'ajouter le combustible pour augmenter la chaleur, ou la fermeture de cette dernière pour arrêter le combustible et diminuer la température.



De même dans le cas de sélection du PIC du fuel Oil (régulateur de pression en cascade), il compare la consigne qui vient du SWITCH avec la sortie du bloc de calcul (FY). Ce bloc fait la différence entre le débit fuel oil à la sortie de la vanne et le débit retour de ce dernier afin de déterminer le débit réel qui est consommé par le four.

Or pour la vanne de vapeur elle est commandée par un régulateur de différence de pression (PDIC). Ce régulateur compare la consigne désirée avec la sortie du bloc de calcul (PDY) qui fait la différence entre la pression de la vapeur et la pression de fuel oil.

### III.3 Analyse critique

Tout au long de cette étude, nous avons constaté des faiblesses qui pourront influencer sur le rendement, la qualité et l'environnement. De cet angle, nous avons résumé les principales causes :

- ✓ **Problème de pollution** : le four éjecte de la fumée noire si le débit de combustible est grand par rapport au débit de l'air, et aussi éjecte de la fumée blanche dans le cas inverse. Dans cette boucle de régulation l'air est en tirage naturel par l'intermédiaire de ce qu'on appelle les registres d'air.
- ✓ **Problème de rendement et de fiabilité** : la fumée noire éjectée par la combustion crée une couche solide qui sulfurise les tubes du four, ce qui rend le chauffage des produits difficile et prend plus de temps.
- ✓ **Problème de perte d'énergie** : Pour augmenter la rentabilité du four il est préférable de consommer du fuel gaz que du fuel oil.
- ✓ **Problème de sécurité** : Le bon fonctionnement du four en pleine sécurité nécessite le contrôle de la pression de la combustion.

## IV. Amélioration de la régulation du débit d'air préchauffé

Comme toute entreprise la SAMIR cherche à augmenter le rendement de sa production et réduire sa consommation en combustible pour se faire on a utilisé le système 'Tirage forcé' qui se fonde sur l'automatique et qui va assurer le développement de l'unité.

### IV.1 Description de la régulation avec tirage forcé

Pour résoudre ce problème il faut un moyen pour contrôler la quantité d'air qui entre dans le four. Pour cela il faut installer deux extracteurs d'air commandés par un régulateur PID pour la mise en circulation de l'air au four. L'organigramme suivant présente le principe de commande de la solution :

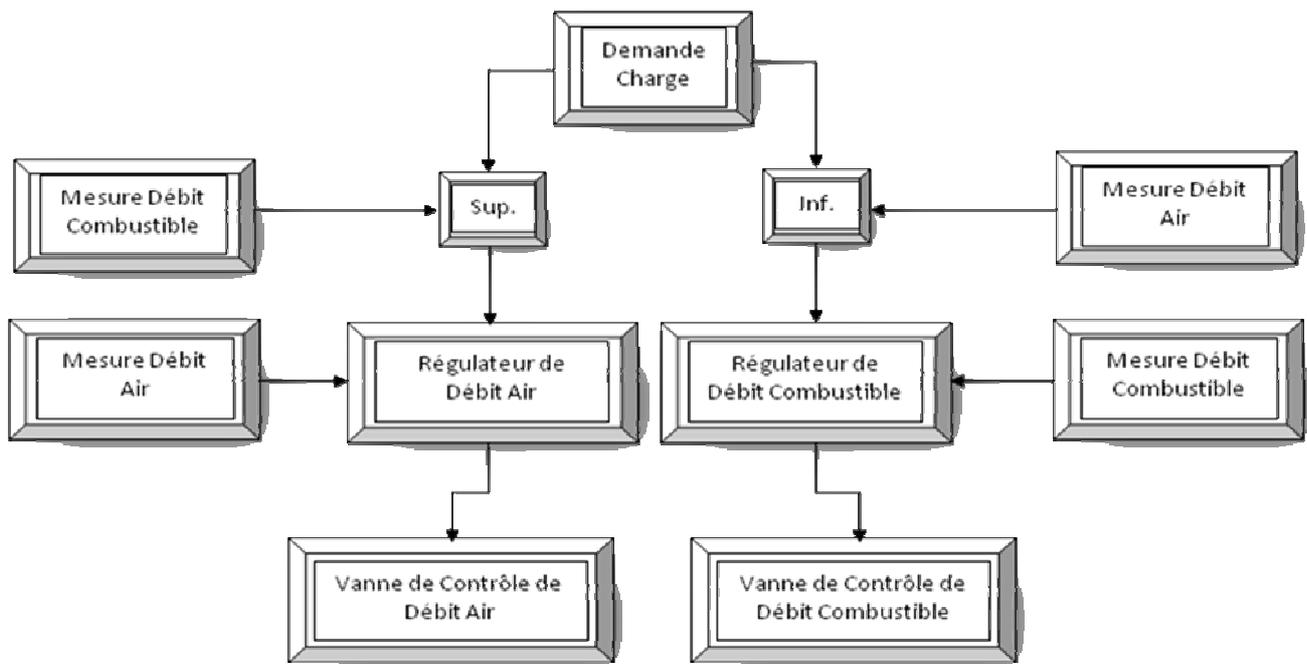


Figure 16:Le principe de commande du tirage forcé

#### IV.2 Amélioration de la régulation du combustible

Pour rendre le four plus rentable il faut minimiser sa demande d'énergie et vu que la SAMIR à toujours une quantité du fuel gaz qui n'est pas utile, nous avons proposé une méthode assez nouvelle pour utiliser cette source de fuel gaz jusqu'à la consommation totale de ce dernier, puis le compenser par le fuel oïl que l'on achète.

Pour la réalisation de cette solution on a :

Le schéma ci-dessous explique la réalisation de notre solution :

- On mesure la pression du fuel gaz et on la passe dans un bloc de calcul (FY) qui fait la différence entre cette mesure et la demande de combustible



- ✓ deux transmetteurs de pression fuel gaz (**PT**).
- ✓ Un transmetteur de débit fuel gaz (**FT**).

•Partie Programmes :

- ✓ Un régulateur de pression (**PIC**)
- ✓ Un régulateur de débit (**FIC**)
- ✓ Un bloc Passe Bas.
- ✓ Un bloc soustracteur.

qui vient du bloc basse bas1, la sortie de ce bloc (FY) va servir comme consigne pour le régulateur de débit fuel oïl (FIC) qui va commandé la vanne de ce dernier afin de compenser le manque subit par le fuel gaz.

Or pour la vanne de contrôle débit fuel gaz qui est commandé soit par:

- un régulateur de débit (FIC) qui reçoit la mesure de débit fuel gaz a partir d'un transmetteur de débit (FT) et de la consigne a partir de bloc passe bas2, ce bloc à deux entrées la 1ere vient de régulateur de pression de fuel gaz et la 2ème vient de bloc passe bas1.
- ou par un régulateur de pression (PIC) qui nous a permis de garder le four a une certaine pression pour ne pas étouffer la flamme. ce régulateur à deux entrées, la 1ère est la mesure de pression qui vient du transmetteur de pression (PT) et la 2ème c'est la consigne de pression que le four doit garder.

## V. Installation après amélioration

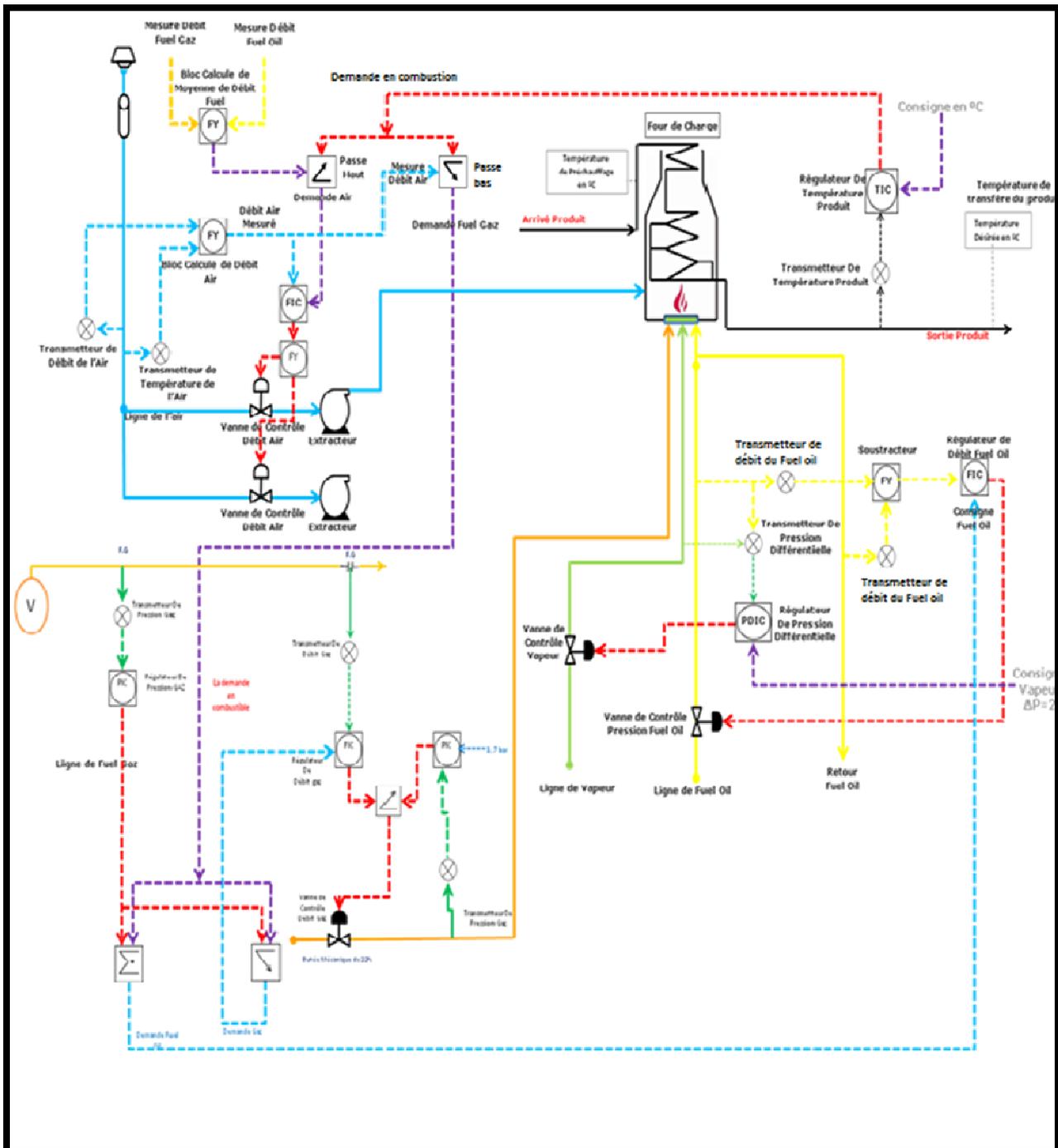


Figure 17: Schéma de la régulation avec les améliorations ajoutées



Cette partie regroupera les paramètres qu'on doit superviser tout en expliquant leurs utilités pour l'instrumentation et la supervision dans les fours. On discutera aussi l'installation d'instruments de mesure fondamentaux.

## I. Température

### I.1. Température de la section de radiation

Les mesures de la température de la section radiantes peuvent être utilisées pour guider le contrôle de la combustion et pour éviter de surchauffer les tubes, la température limite de design dans la zone de radiation du four 011F1 est fixée à **395°C**. Les thermocouples dans la section radiante devraient être installés avec les puits ou les autres appareils protecteurs. Le point de mesure ne devrait pas être dans une branche d'acheminement de données du gaz froide, ni la flamme du brûleur devrait se heurter sur lui. Les matières du thermocouple doivent être résistantes aux températures de la zone. Le fer et l'acier inoxydable sont des matières généralement acceptables. Pour des contraintes plus sévères, des revêtements en céramique sont souvent utilisés.

### I.2 Température de la section de convection

La mesure de la température du gaz du tuyau de cheminée dans la section de convection est utile pour contrôler l'efficacité, la température limite de design dans la zone de convection du four 011F1 est fixée à **400°C**. Le thermocouple doit être capable de supporter la température dans la section de convection, bien que les conditions dans cette section radiante. L'acier inoxydable est généralement une manière satisfaisante.

### I.3 Température dans la cheminée

La température à la cheminée est utile pour évaluer la performance totale du four et pour garder la température de la cheminée dans les limites acceptables. Une température élevée peut indiquer une rupture du tube. En revanche, si la température est au-dessous du point de rosée, la corrosion sévère est possible dans la cheminée à cause de la présence de gaz acides. Alors cette



température doit être supérieure à **180°C** « point de rosé » et inférieur à **300°C**. Donc un thermocouple doit être installé près du point de l'échantillonnage pour l'analyse du gaz.

#### I.4 Températures du fluide chauffé

Les températures du fluide chauffé doivent être prises à un nombre suffisant d'emplacements pour évaluer la performance et assurer une exploitation fiable. Puisque le four 011F1 chauffe le brut, donc on doit installer plusieurs thermocouples pour avoir un profil de température.

On citera les emplacements où on doit installer les thermocouples.

- L'entrée du four.
- Chaque croisement de la section de convection à la section radiante.
- Chaque sortie du four.

Les thermocouples doivent être bien placés afin qu'ils soient exposés au flux et non dans un emplacement stagnant où ils peuvent être séparés par le coke.

La température de brut chauffé destiné à la colonne de distillation doit être fixée à **370°C**.

#### I.5 Température de la peau du tube

Les mesures de température de la peau des tubes, sont utilisées pour éviter la surchauffe des tubes suite à une réduction du débit à travers le tube ou lors de cokéfaction. Une mesure de la peau du tube devrait être faite dans deux ou trois tubes. Le point peut être sélectionné le mieux en considérant le profil de la température anticipé. Il est important que la température soit déterminée à ou près de la plus haute section du profil de la température elle est limitée à **271°C**.

#### I.6. Température du combustible

La mesure doit être faite à l'aide d'un thermocouple, ou ampoule de la résistance. Dans les plus mauvaises conditions, une basse température peut causer une flamme pauvre ou sale. D'autre part, une température trop haute peut causer la carbonisation de la pointe du brûleur.

- Dans le cas du Fuel Gaz : **T >120°**
- Dans le Cas du Fuel Oil : **T = 25°**



## I.7. Température d'air de combustion dans le récupérateur de chaleur

La mesure de la température à l'entrée de l'air et de la température des fumées à la sortie de la cheminée sont exigés pour évaluer la performance du préchauffeur, et comme un guide pour maintenir la température des fumées au-dessus du point de rosée pour prévenir la corrosion. Etude faite dans le chapitre de dimensionnement de chaleur.

## II. Pression et débit

### II.1. La pression dans le four

Cette mesure est utilisée comme un guide à l'exploitation du four. Les mesures de la pression devraient être faites en amont et en aval des ventilateurs, à travers le réchauffeur d'air, dans le canal d'air venant du préchauffeur vers les brûleurs, au bas et au sommet de la section radiante. La mesure de la dépression pour l'arrêt d'urgence du four est localisée typiquement au sommet du tuyau de la cheminée le four en général doit être en dépression.

### II.2. Débit du combustible

Le gaz du combustible et le flux du fuel peuvent être mesurés avec les appareils tels que des orifices calibrés ou des compteurs à turbine. Un débitmètre devrait être installé dans la ligne du combustible principale, où la pression est constante. Pour les combustibles gazeux, là où la densité ou la pression varie, la correction du flux pour ces variables est désirable. ce débit vari selon la charge du Four.

### II.3. Pression du combustible

#### II.3.1. Cas du combustible gazeux

La pression du combustible doit être entre **0.5** et **2** bars pour éviter l'extinction des brûleurs. Donc une alarme est recommandée en cas de baisse de pression.

#### II.3.2 Cas du fuel oil

Pour le cas du fuel, une vanne de régulation est reliée à l'indicateur de température de la charge à la sortie pour chaque four, la vanne s'ouvre si la température chute et vis versât.



Puisque la vapeur d'atomisation est utilisée pour pulvériser le fuel oil, il est nécessaire de contrôler la pression différentielle entre le combustible et la vapeur, de telles sortes que la différence de pression entre la vapeur et FO est de **1 à 2 bars**.

#### II.4. Débit d'air de combustion

Le flux de l'air dans les fours à tirage forcé est une mesure importante pour contrôler l'excès. La méthode d'obtention de cette mesure est d'installer un venturi sur la colonne d'admission d'air en amont du ventilateur.

- Le débit maximal : 35 000 kg/h ;
- Le débit minimal : 7200 kg/h ;
- Le débit d'alarme : 14 000 Kg/h ;

#### II.5. Mesure de la pression différentielle à travers le réchauffeur d'air

Cette mesure est importante pour connaître l'état d'encrassement de l'échangeur côté fumée. Ainsi, on pourra planifier la maintenance et la fréquence de nettoyage de l'échangeur. Généralement pour le Four 011F1 elle ne doit pas dépasser **80 mmH<sub>2</sub>O**.

### III. Analyses

#### III.1. Analyse des fumées de la cheminée

Les analyseurs de gaz sont souvent utilisés comme un moyen de contrôle de l'efficacité de la combustion et des émissions atmosphériques. Les méthodes indirectes peuvent être aussi une technique acceptable pour satisfaire ces exigences. Les points de mesure devraient être localisés à la sortie de chaque chambre de combustion, et dans la sortie de la section de la convection afin que la composition de gaz du tuyau de cheminée puisse être déterminée par analyse.



### III.2. Teneur en oxygène

Pour maintenir l'efficacité et la sécurité du processus de combustion, l'oxygène en excès est une mesure importante. Un superviseur de la combustion ajuste continuellement l'alimentation du combustible pour satisfaire les exigences de la charge variables et maintenir une proportion

correcte d'air / combustible. Pour obtenir une bonne mesure concernant la qualité de combustion, les échantillons devraient être apportés aussi proche que possible au point où la combustion est complétée, normalement à la sortie de la section radiante. Pour obtenir le pourcentage d'oxygène dans la cheminée, un analyseur d'oxygène est utilisé. L'analyseur peut aussi être utilisé pour l'alerte en cas d'excès d'air important ou d'un défaut d'air.

Le pourcentage d'oxygène limite pour le four 011F1 est **6%**.

**Remarque :** les valeurs des débits, températures et pressions sont prises depuis la salle de contrôle de Topping 2 et les data sheet du four 011F1.



## Chapitre IX : Evaluation économique



L'initiation d'un projet impose l'implication de moyens importants tant en matériel qu'humain et d'être entouré d'un maximum de précaution lors du processus de développement du projet. Il faut pouvoir porter des arguments de valeur sur le projet tant sur le plan qualitatif (faisabilité technique) que sur le plan quantitatif en essayant par l'évaluation économique de chiffrer la rentabilité du procédé.

## **I. Coût d'investissement** <sup>[13]</sup>

L'investissement comprend l'ensemble des coûts relatifs à la conception de l'installation, aux équipements et à leurs installations, et représente la somme des dépenses facturées par les fournisseurs de ces services.

### **a) Echangeur de chaleur**

Le coût de l'échangeur de chaleur dépend de la surface d'échange, du type d'échangeur ainsi que du matériau utilisé pour la construction... etc.

L'évaluation économique de l'échangeur est basée sur les données proposées par la société RIZZI ENGINEERING; C'est le fournisseur principal des équipements thermiques dans la SAMIR.

$$\underline{I(\text{Echangeur}) = 1\ 252\ 788,317\text{DH}}$$

### **b) Extracteur et deux ventilateurs**

Le coût de l'extracteur et des deux ventilateurs est estimé auprès des fournisseurs industriels.

Donc le coût de l'extracteur qu'on va installer est de :

$$I(\text{extracteur et deux Ventilateurs}) = 1\ 531\ 990,9\text{DH}$$

### **c) Les brûleurs**



D'après les appels d'offre lancé par la SAMIR, les brûleurs qu'on va installer sont de type : mixte, qui fonctionnent en tirage forcé de l'air .Le four 011F1 est doté de 9 bruleurs cela fait un total de :

$$I(\text{brûleurs}) = 856\,025 \text{ DH}$$

#### **d) Instrumentation**

Le nouveau système qu'on va mettre en place demande des moyens de contrôle automatique pour superviser la pression et la température dans les zones critiques du circuit et donc assurer un fonctionnement bien conditionné.

Le coût de l'instrumentation selon l'expérience des services techniques et l'expérience des responsables à la SAMIR est de l'ordre de :

$$I(\text{Instrumentation}) = 4\,400\,000 \text{ DH}$$

#### **e) Isolation thermique**

- Calorifugeage des conduites d'air :

La laine de verre offerte avec un coût de 9 DH/m<sup>2</sup> pour une épaisseur de 10 mm. Elle est l'un des isolants les moins chers sur le marché.

La surface des conduites d'air est de 44 m<sup>2</sup>, donc le calorifugeage est de 400 DH.

- Calorifugeage des conduites des fumées

Le béton réfractaire offert avec un coût de 16 DH/m<sup>2</sup> pour une épaisseur de 18 mm.

La surface des conduites d'air est de 80 m<sup>2</sup>, donc le calorifugeage est de 1280 DH.

- Calorifugeage de l'échangeur

Le calorifugeage de l'échangeur représente 0,5 % du coût de l'échangeur, c'est-à-dire 4600 DH.

$$I(\text{Isolation thermique}) = 6300 \text{ DH}$$

Le tableau 8 résume les investissements du projet cité ci-dessus, en plus des autres investissements relatifs aux travaux mécanique, génie civil, et la formation du personnel. Ces



investissements sont estimés grâce à l'expérience des ingénieurs projets à la SAMIR qui travaillent souvent sur des projets similaires.

Equipement et Services	Prix en DH
Echangeur	1 252 788,317
2 Ventilateurs d'air et extracteur	1 531 990,9
Brûleurs	856 025,5
Guillotines et registres	805 299
Instrumentation	4 400 000
Travaux génie civil	638 000
Travaux mécaniques	4 730 000
Travaux électriques	330 000
Armoire électrique	330 000
Câbles électriques	440 000
Joints d'expansion	57 200
Formation du personnel	90 000
Isolation thermique	6300
<b>Frais Annexes</b>	
Transport du gros matériel	22 700
Douane	90 000
Assurances	15 000
Frais de démarrage	38 000
Imprévus	90 000
<b>Autres</b>	
Frais de roulement	60 500
Frais d'entretien	220 000
<b>TOTAL</b>	<b>16 003 803,72</b>

Tableau 8: Résultat des calculs du coût d'investissement

Le coût d'investissement global est I = 16,003 MDH.



## II. Gain annuel

L'installation du système de récupération de chaleur qu'on a dimensionnée pour le four 011F1 permet l'augmentation du rendement du four en diminuant la consommation du fioul, et donc générer un gain annuel très important qui correspond au nouveau rendement.

Tout d'abord on établit le nouveau bilan de matière avec le système de récupération de chaleur.

Les chaleurs absorbées par le four avant et après l'installation du système du préchauffage sont données dans le tableau suivant :

	Rendement $\eta$ (%)	Chaleur absorbée (Kcal/h)
<b>Tirage naturel</b>	73,17	$15,43.10^6$
<b>Tirage forcé</b>	88,6	$12,72.10^6$

**Tableau 9:Amélioration du rendement après l'installation du récupérateur**

L'ancien rendement du four 011F1 est :

$$\eta = 73,17\%$$

Le nouveau rendement avec la nouvelle installation est :

$$\eta = 88,6\%$$

L'installation du système de récupération de chaleur permet l'augmentation du rendement par une différence de  $\cong 15\%$ .

$$D_{\text{Fioul011F1}} = \frac{Q_{\text{Abs}}}{\text{PCI} * \eta_{011F1}}$$

Le débit de fioul consommé dans le cas de tirage naturel est de :

$$D_{\text{Fioul011F1}}(\text{tirage naturel}) = 2201,77 \text{ kg/h}$$

Le débit de fioul consommé dans le cas de tirage forcé est de :

$$D_{\text{Fioul011F1}}(\text{tirage forcé}) = 1505,68 \text{ kg/h}$$

Le gain qu'on peut réaliser avec la nouvelle installation correspond à la différence du débit du combustible qu'on peut économiser dans le four 011F1.

$$\Delta D_{\text{Fioul011F1}} = 696 \text{ kg/h}$$



Les économies réalisées pour une exploitation continue avec 24 jours d'arrêt annuelle sont calculés suivant la relation suivante :

$$E_{co} = \Delta D_{\text{Fioul}} * 24 * (365 \text{ jours} - 24 \text{ jours})$$

$$E_{co} = 5\,696\,064 \text{ kg/an}$$

Pendant une année on peut économiser **5 696 064** kg du Fioul oil, et sachant que le fioul oil coute pour la SAMIR 5000 DH/Tonne, on peut réaliser un gain annuel de :

$$B = 28\,480\,320 \text{ DH/an}$$

### III. Amortissement et rentabilité du projet

Quel que soit la nature d'un projet, sa motivation et son degré d'élaboration, la préoccupation majeure d'un industriel à son égard consiste à savoir s'il sera rentable de le concrétiser, en d'autres termes, s'il générera des bénéfices.

L'évaluation budgétaire permettra à la direction générale de SAMIR de connaître le coût de l'installation. De ce fait elle revêt un caractère important dans la mesure où c'est sur la base de cette évaluation budgétaire que le temps de remboursement sera calculé. Ce dernier étant en définitive le critère déterminant à partir duquel la direction générale donnera son accord et débloquera les fonds nécessaires à la réalisation du projet.

#### a) Amortissement du projet

Il existe une multitude de démarches qui s'appliquent au calcul de l'amortissement annuel d'un projet, parmi lesquelles nous citons :

- L'amortissement linéaire (Straight-line method) ;
- L'amortissement dégressif (Declinign balance method) ;
- L'amortissement économique constant (sinking fund method).

Concernant notre étude, c'est la méthode d'amortissement linéaire qui a été adoptée pour question de simplicité.



L'amortissement annuel  $A$ , donné par la méthode de l'amortissement linéaire est suivante :

$$A = \frac{I - I_r}{n}$$

Avec :

$I$  : Investissement global de l'installation ;

$I_r$  : Valeur résiduelle de l'équipement à la fin de la durée de vie, nous prenons  $I_r = 0$  ;

$n$  : Durée de vie de l'équipement.

On obtient donc:

$$A = \frac{I}{n}$$

Remarque :

La durée de vie d'un échangeur de chaleur est estimée à  $n = 11$  ans.

On peut en conclure que l'amortissement annuel sera évalué à :

$$A = 1\,454\,892\text{DH}$$

## b) Evaluation de la rentabilité du projet

Il existe de nombreuses méthodes permettant d'apprécier le retour sur investissement d'un projet parmi lesquelles on cite :

- **La méthode du « POT »** ou du temps de remboursement simplifié ; qui est défini comme étant la durée au bout de laquelle les recettes totales liées au fonctionnement d'une unité ou d'un complexe, déductions faites de toutes les sorties y compris les taxes, sont égales au montant global des investissements nécessaires à l'achat, la construction, le démarrage..., des installations, c'est-à-dire au montant du capital amortissable initial.
- Les méthodes reposant sur le bénéfice actualisé ou Cash flow actualisé ; qui se basent sur le calcul du revenu annuel, l'actualiser et examiner ses variations en fonction du temps par la suite.



- **Le taux de rentabilité interne** « rate of return » ou « Internal Economic Return » ; ce taux est égal à la valeur du taux d'actualisation  $i$  qui annule le bénéfice actualisé sur  $n$  années.
- **Taux de rotation du capital** ; ce taux représente le rapport du chiffre d'affaires annuel au capital investi. Il permet de classer des projets de natures différentes, impliquant des schémas de procédés très éloignés dans leur conception et par suite des mises de fonds initiales nettement distinctes. C'est une mesure du renouvellement des sommes immobilisées.
- **Méthode du point mort**....etc.

La méthode du « **POT** » est la plus fréquemment utilisée, et est considérée comme étant un critère de rentabilité déterminant, c'est pour cette raison que nous l'adoptons pour évaluer le gain du projet.

Le POT représente le temps au bout duquel l'entreprise, qui a consenti l'investissement  $I$ , récupérera son capital immobilisé sous forme de bénéfices réels (taxes déduites) et sous forme d'une provision pour amortissement.

Il est donné, en années, par l'expression suivante:

$$POT = \frac{I}{B * (1 - a) + A}$$

Avec :

$B$  : Bénéfices bruts annuels (avant déduction des impôts) ;

$a$  : Taux d'impôt sur les bénéfices bruts ;

$A$  : Annuité d'amortissement.

<b>Bénéfices bruts annuels DH/an</b>	28 480 320
<b>Taux d'impôt sur les bénéfices bruts</b>	30 %
<b>Annuité d'amortissement DH/an</b>	1 454 892
<b>Investissement global DH</b>	16 003 803,72



Le calcul du POT donne 8 mois pour rembourser l'investissement.

$$\text{POT} \cong 8\text{mois}$$

## Conclusion

Il s'avère que c'est très important pour la SAMIR de réaliser ce projet, sachant qu'on puisse faire une économie énergétique, donc un gain annuel estimé à 28,48MDHS/an avec un temps de retour sur investissement de 8 mois.



## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le présent travail est l'un des projets entretenus par la SAMIR visant les économies d'énergie et la rénovation des équipements de la raffinerie. Il est porté sur le dimensionnement d'un système de récupération de chaleur du four 011F1.

Ainsi, on a développé une méthodologie de travail qui peut être généralisée aux autres fours de la raffinerie et pourra être une source d'inspiration pour la récupération d'énergie dans les autres types de four.

Dans la présente étude, nous avons pu traiter et analyser plusieurs volets. Nous avons commencé par une étude bibliographique sur les fours suivie de l'établissement d'un bilan thermique et le calcul de rendement du four 011F1. Dans la partie conception, le dimensionnement de l'échangeur de chaleur qui nous a permis de déterminer la surface d'échange nécessaire, un dimensionnement pour les autres équipements (Ventilateur d'air, Extracteur de fumées, Brûleurs) et nous avons complété cette étude par une partie de calorifugeage.

Par la suite, nous avons regroupé les paramètres assurant la bonne marche du système de récupération de la chaleur. Ainsi nous avons étudié la boucle de régulation avec tirage forcé ce qui a augmenté le rendement du four de 15%.

En fin, une évaluation économique de l'installation proposée nous a permis de chiffrer et examiner la rentabilité du procédé, en contactant les fournisseurs, et en profitant de l'expérience des ingénieurs projet de la raffinerie ce qui nous a permis de réduire la consommation spécifique du fuel en récupérant l'énergie des fumées au niveau des fours et d'avoir un temps de retour sur l'investissement de 8 mois.

La présente étude n'est pas une fin en soi, il est souhaitable de la compléter par :

- Une étude plus approfondie sur le calorifugeage des parois et des canalisations.
- Une autre étude plus détaillée de régulation et d'opérabilité du système.
- Simultanéité de la conception et du contrôle.
- Etude de l'installation du système de récupération dans les autres fours de la raffinerie.

## ANNEXE III



**La masse volumique et la viscosité cinématique de l'air sous la pression atmosphérique normale de 101325 Pa (calcul selon ISO 5801 [12])**

**ANNEXE IV**

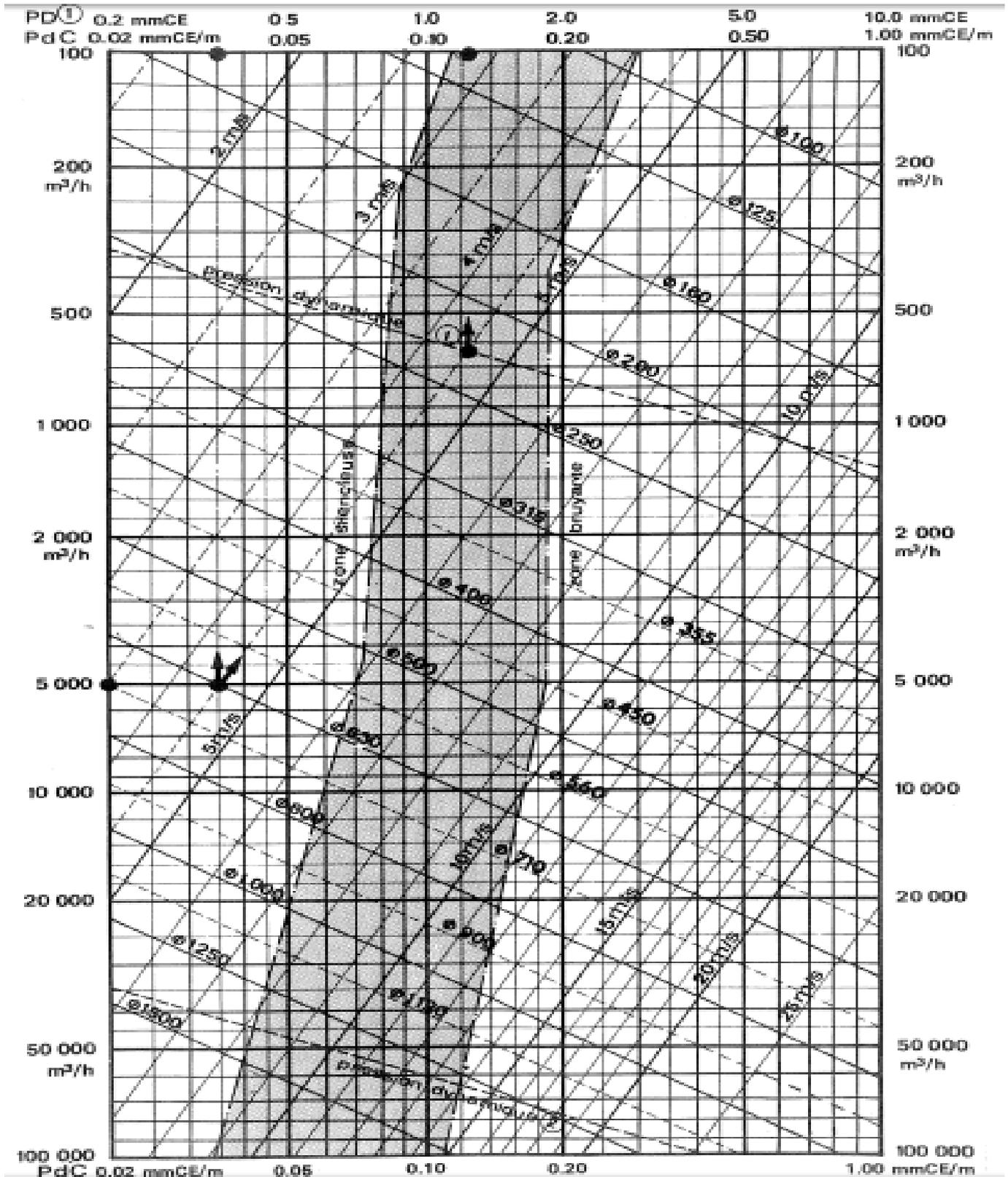
Température °C	Air sec		Air humide (humidité relative 50%)	
	Masse volumique Kg/m <sup>3</sup>	Viscosité cinématique 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s	Masse volumique Kg/m <sup>3</sup>	Viscosité cinématique 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s
-20	1.395	1.157	1.394	1.158
-10	1.342	1.239	1.341	1.239
0	1.293	1.323	1.291	1.325
10	1.247	1.410	1.244	1.413
<b>20</b>	<b>1.204</b>	<b>1.500</b>	<b>1.199</b>	<b>1.506</b>
30	1.165	1.592	1.155	1.605
40	1.127	1.687	1.112	1.711
50	1.093	1.785	1.067	1.827
60	1.060	1.885	1.020	1.958
70	1.029	1.989	0.969	2.111
80	1.000	2.095	0.911	1.297
90	0.972	2.203	0.845	2.535
100	0.946	2.315	0.767	2.854

**La vitesse maximale de l'air en fonction du débit**



Débit de transit dans les canalisations [Kg/h]	Vitesse maximale [m/s]
Débit < 300	2,5 [m/s]
Débit < 1000	3 [m/s]
Débit < 2000	4 [m/s]
Débit < 4000	5 [m/s]
Débit < 10 000	6 [m/s]
<b>Débit &gt; 10 000</b>	<b>7 [m/s]</b>

**ANNEXE V**  
**Abaque de pertes de charges linéaires**



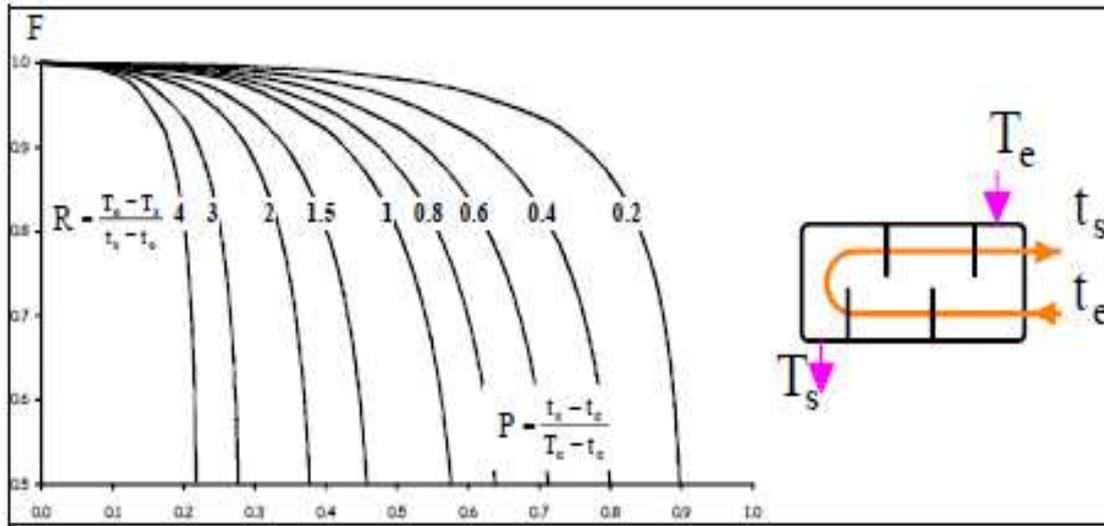


**ANNEXE I**  
**Composition chimique des fumées**

Eléments chimiques	Composition%	Chaleur spécifique (J/Kg.K)
N2	83.33	1058.67
O2	4	964.884
CO2	12.4	1017.56
NO	6.36 *10-3	1018.89
SO2	0.26	766.5

$$C_{p \text{ fumées}} = \sum_{i=0}^5 X_i \cdot C_{pi}$$
$$C_{p \text{ fumées}} = 1049,048 \text{ J/Kg.K}$$

**ANNEXE II**  
**L'abaque pour la détermination du facteur de correction F**





## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Généralités sur les fours de raffinage « enspm, Formation Samir ».
- [2] : J.LE NOGUES, « Etudes des fours pétrolier et chimique », Edition technip-1974.
- [3] : Werner HEILIGNSTAEDT, « Thermique appliquée aux fours industriels » Tome2, DUNOD Paris 1997.
- [4] : American Petroleum Institute «Fired heaters for general refinery service », API560.
- [5] : La division énergétique de SAMIR en collaboration avec l'équipe « Shell global solution ».
- [6] : Formation à la SAMIR, « Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs ».
- [7] : Techniques de l'ingénieur, « Transferts thermiques ».
- [8] : Techniques d'ingénieur, « Echangeur de chaleur-Dimensionnement thermique ».
- [9] : Techniques de l'ingénieur, « Echangeurs de chaleur : Problèmes de fonctionnement ».
- [10] : Stanley. M.WALLAS, « Chemical Process Equipment Selection and Design » (1991).
- [11] : M.Meury, « Memento des pertes de charge ».
- [12] : J.LIGEN et M. LE GUAY, « le boussicaud » 'Pertes de charge'.
- [13] : CHAUVEL : "Manuel d'évaluation économique des procédés"(1976).

## Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	89
----------------------------	----



---

<b>Chapitre I : Présentation de la société .....</b>	<b>90</b>
I. Présentation de SAMIR.....	91
II .Fiche signalétique .....	92
III. Organigramme général .....	92
IV .Les produits pétroliers de la SAMIR.....	93
<b>Chapitre II : Généralités sur les fours .....</b>	<b>98</b>
I. Généralités.....	99
II. Notions sur les fours .....	102
<b>Chapitre III :Diagnostic du Four 011F1.....</b>	<b>105</b>
I .Description du four 011F1 .....	106
II. Etude du problème .....	107
III. Bilan thermique du four 011F1 .....	109
<b>Chapitre IV : Modes de récupération de la chaleur .....</b>	<b>112</b>
I. Généralités sur les systèmes de préchauffage de l'air.....	113
II. Les principaux types d'échangeurs de chaleur .....	113
III. Types des systèmes de préchauffage de l'air.....	116
IV. Choix du type de l'échangeur de chaleur .....	117
V. Considérations générales pour la conception.....	118
VI. Paramètres de marche de la combustion .....	119
VII. Ajustement de l'excès de l'air.....	119
VIII. Fonctionnement en mode naturel.....	119
IX. Contrôle de la température froide des fumées.....	120
X. Dimensionnement de l'échangeur de chaleur.....	120
XI. Considérations pour les fuites d'air dans les fumées.....	121
<b>Chapitre V : Dimensionnement de l'échangeur.....</b>	<b>121</b>
I .Méthode DE DTML.....	122
<b>Chapitre VI : Dimensionnement des équipements auxiliaires .....</b>	<b>129</b>
I. Dimensionnement des ventilateurs.....	130
II. Dimensionnement de l'extracteur des fumées .....	135
III. Dimensionnement des brûleurs .....	137



---

IV. Calorifugeage .....	138
<b>Chapitre VII : Régulation du Four 011F1.....</b>	<b>140</b>
I .But de régulation.....	141
II .Outils utilisés .....	141
III. Description de la régulation.....	146
IV. Amélioration de la régulation du débit d'air préchauffé .....	148
V. Installation après amélioration.....	150
<b>Chapitre VIII : Instrumentation et contrôle.....</b>	<b>151</b>
I.Température .....	152
II.Pression et débit.....	154
III. Analyses .....	155
<b>Chapitre IX : Evaluation économique .....</b>	<b>157</b>
I. Coût d'investissement .....	158
II. Gain annuel.....	161
III. Amortissement et rentabilité du projet .....	162
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>166</b>

## INTRODUCTION GENERALE

L'exploitation de l'énergie dans les différents domaines d'industrie est considérée comme un élément très important sur lequel il faut agir de telle sorte que tous les processus industriels fonctionnent avec le minimum possible d'énergie consommée. Cet aspect s'accroît avec la nouvelle conjoncture internationale de la hausse des prix énergétiques.



Dans cette perspective, notre travail consiste à optimiser l'utilisation d'énergie par des méthodes scientifiques et techniques pouvant être appliquées dans les différentes disciplines de l'industrie de transformation et de pétrochimie.

La consommation énergétique dans le domaine de raffinage du pétrole est très importante, et cela apparaît dans les différentes unités telles que la distillation, le craquage ainsi que la production des utilités (vapeur d'eau).

Avant que le flux d'alimentation arrive à la colonne de distillation, il passe par un train d'échange pour le préchauffage puis par le four de chauffage direct pour atteindre les températures de séparation.

L'objectif de notre travail est d'optimiser l'efficacité du four O11F1 de Topping 2, conçu dans les années 60, par la mise en place d'un système de récupération de la chaleur à partir des fumées.

La méthodologie adoptée pour atteindre l'objectif de ce travail est résumée comme suit :

- Chapitre I : Présentation de la société.
- Chapitre II : Généralités sur les fours.
- Chapitre III : Diagnostic du four O11F1.
- Chapitre IV : Modes de récupération de la chaleur.
- Chapitre V : Dimensionnement de l'échangeur de chaleur.
- Chapitre VI : Dimensionnement des équipements auxiliaires.
- Chapitre VII : Régulation du four O11 F1.
- Chapitre VIII : Instrumentation et contrôle.
- Chapitre IX : Evaluation économique.

## **Chapitre I : Présentation de la société**



## I. Présentation de SAMIR

La SAMIR (Société Anonyme Marocaine d'Industrie de Raffinage), leader dans le domaine de raffinage de pétrole, créée en 1959 pour assurer un approvisionnement permanent en matière d'énergie, ce qui procure au pays une certaine autonomie, et aide à faire face aux défis du développement.

Le raffinage représente la principale activité au sein de la SAMIR, et cette dernière à elle seule dispose d'une capacité de raffinage de 8 000 000 Tonnes/an (propane, butane, fuel-oil, huile de base, bitumes, paraffines...) à partir du pétrole brut importé d'Arabie Saoudite (Arabian light), D'Irak (Kirkuk), d'Iran (Iranian light) et de Russie (Ural).

La SAMIR est une filiale à 67,27% de Corral Holding (Société de droit suédois à capitaux saoudiens). Le reste, soit 32,73% est détenu par divers actionnaires à la bourse de Casablanca.

La SAMIR reçoit cinq pétroliers de brut par mois et exporte 25% de sa production.

Dans le cadre de la première phase du processus de privatisation de la société en 1996, la SAMIR est introduite à la bourse de Casablanca, avec une part de 30% du capital social.

En 1998, le Groupe Saoudien Corral a acheté 64,73% de la SAMIR, et en 1999 la SAMIR est fusionné avec la SCP (Société Chérifienne du Pétrole).

En 2004, le Groupe Saoudien Corral s'est engagé à moderniser la SAMIR avec un investissement dont l'enveloppe globale s'élève à plus de 7 millions de Dirhams.

Aujourd'hui la SAMIR s'inscrit dans une démarche qualité, en faisant la reconstruction de ses départements, et la formation de personnels pour s'orienter vers l'amélioration continue de la société.



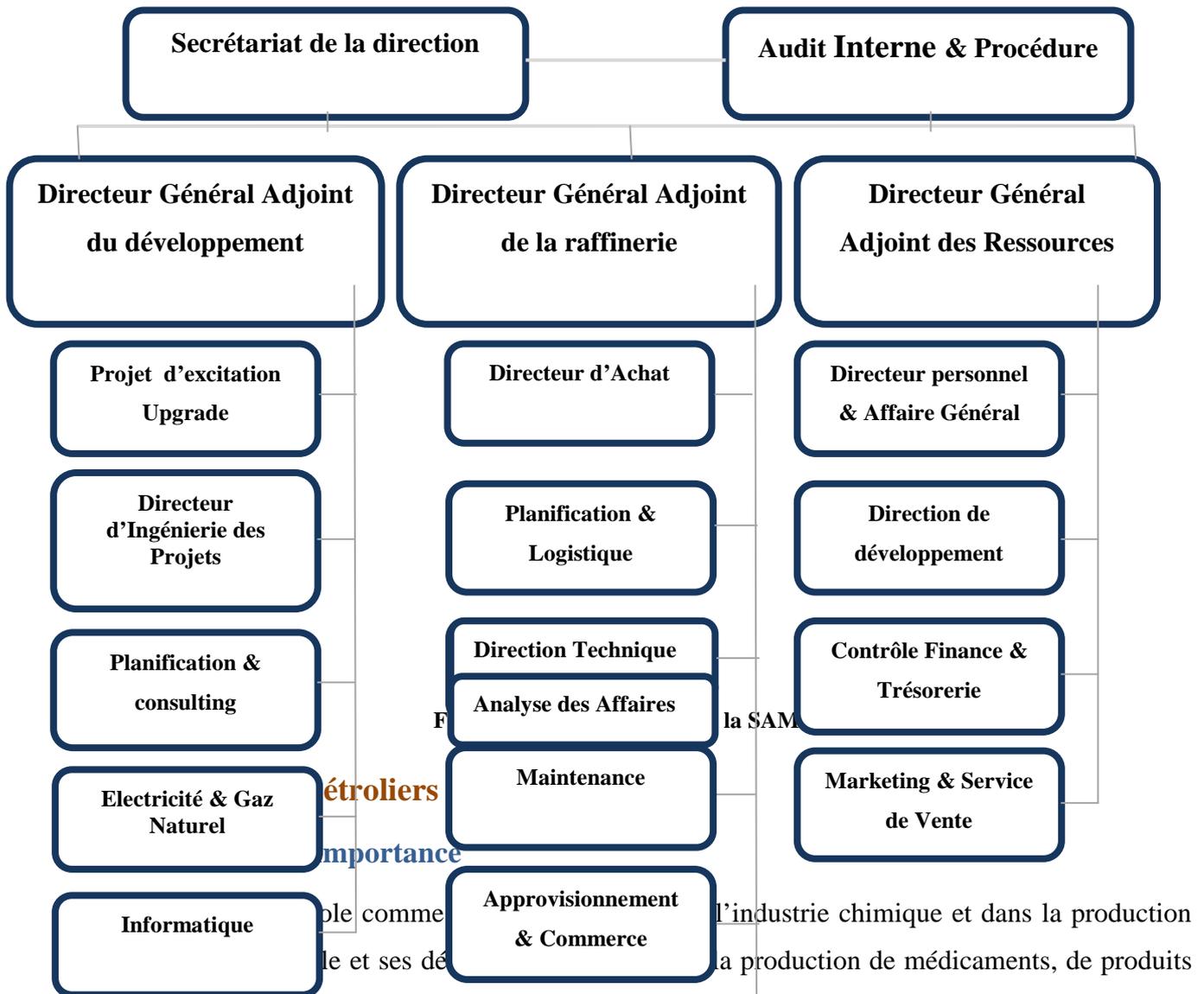
## II .Fiche signalétique

<b>Raison Social</b>	SAMIR (société anonyme marocaine de l'industrie du raffinage)
<b>Capital Social</b>	1.236.586.500.DH
<b>Adresse</b>	route côtière 111, BP : 89.Mohammedia Tél. (212) 0523324201/0523312240/0523327480 Fax. (212) 0523316956/0523317188
<b>Date de création</b>	1959 par l'état marocain et l'office italien des Hydrocarbures
<b>Président/Directeur général</b>	Mohammed Hussein Sheikh al Amoudi/ Jamal Ba-Amer
<b>PATENTE</b>	39404860
<b>Secteur d'activité</b>	raffinage du pétrole, exploration pétrolière
<b>Capacité de production</b>	8 000 000 tonnes/an
<b>Chiffre d'affaire</b>	37 Milliards de DH (Exercice 2010)
<b>Effectif</b>	1528
<b>Site Internet</b>	<a href="http://www.SAMIR.ma">www.SAMIR.ma</a>
<b>Actionnariat</b>	CORRAL (67.27 %)
<b>Capacité de production</b>	6,25 T/An

Tableau 10: Fiche signalétique de la SAMIR

## III. Organigramme général





Le pétrole est une ressource naturelle d'importance primordiale comme celle du gaz naturel. Il est utilisé dans l'industrie chimique et dans la production de médicaments, de produits agrochimique et alimentaire, de matières plastiques, de matériaux de construction, de peinture et de fibres synthétique, de détergents et de caoutchouc, ainsi que dans la production électrique.

En effet notre civilisation industrielle moderne dépend du pétrole et de ses dérivés, la structure physique et le mode de vie des communautés urbaines entourant les grandes villes sont le résultat d'un approvisionnement en pétrole à grande échelle et peu coûteux.

C'est la première source d'énergie mondiale, il fournit près de la moitié de la demande totale d'énergie primaire.



Le pétrole est devenu une arme politique, comme l'ont démontré les deux chocs pétroliers des années 1970. L'offre et la demande de pétrole, son prix, les solutions de remplacement et les économies d'énergie sont des questions constamment débattues.

## IV.2 Les dérivés du pétrole

Le traitement du pétrole brut permet de dégager certains composants à Caractère chimique différent à savoir

Produits pétroliers	Utilisations
<b>Propane</b>	combustible dans le secteur industriel, chauffage domestique et hôtelier
<b>Butane</b>	combustible à usage domestique (cuisine, chauffage,...)
<b>Naphta</b>	Elément utilisé dans les industries pharmaceutiques
<b>Jet A1</b>	Carburant pour avion, extrait du Kérosène
<b>Fuel-oil</b>	Combustible consommé dans les fours et les chaudières industrielles
<b>Paraffines</b>	Elément utilisé dans l'industrie des bougies, pneumatique...
<b>Bitumes</b>	Elément utilisé dans la construction des routes, étanchéité des bâtiments et pneumatique
<b>Pétrole lampant</b>	Il est utilisé comme solvant dans l'industrie chimique
<b>Gasoil 50, Gasoil 350</b>	Carburants pour les moteurs diesels
<b>Essence super sans plomb</b>	Carburant des moteurs à allumage commandé
<b>Huiles de base 150 NS, 300 NS, 600 NS et BBS</b>	Eléments qui rentrent dans la fabrication des huiles finies. Elles sont destinées aux sociétés qui fabriquent les huiles lubrifiantes

Tableau 11: Liste des produits pétroliers de la SAMIR

IV.3

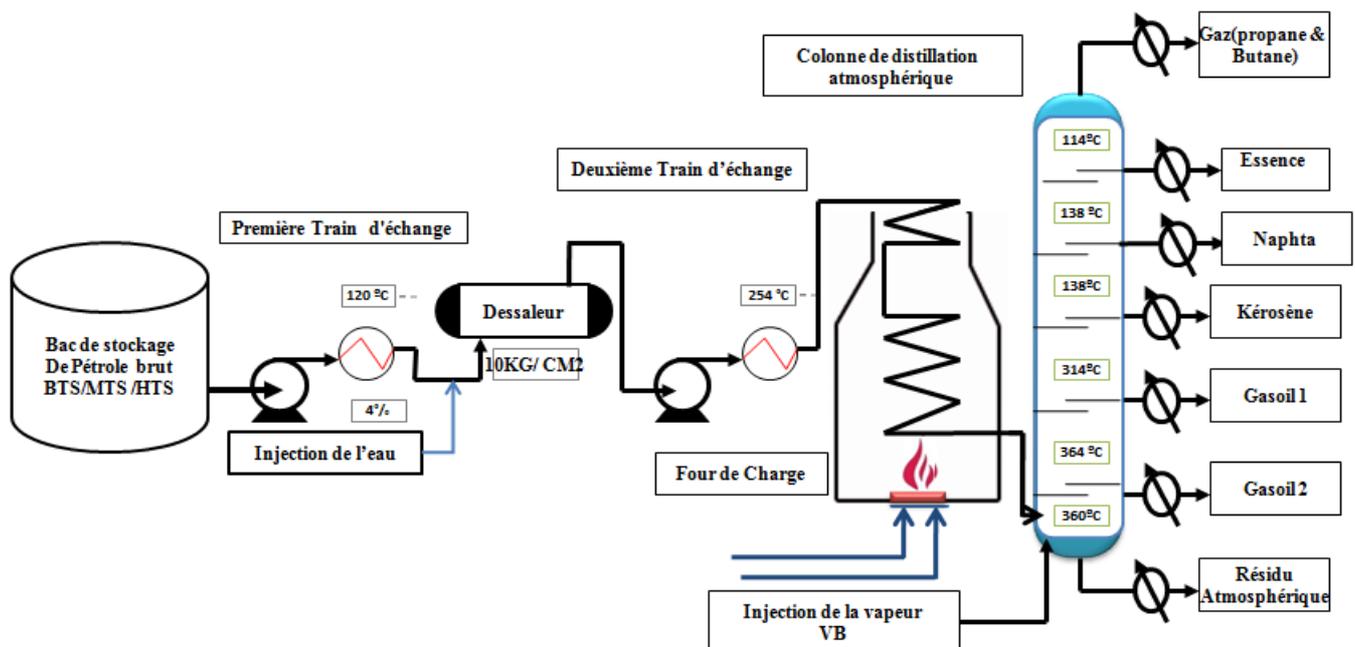


## Les installations techniques

SAMIR se divise en 3 grandes zones industrielles. Chaque zone englobe des unités de fabrication ou de traitement, on distingue :

- **ZONE I** : MEROX – TOPPING I ET II- PLATFORMIN-CTE I-MPE I
- **ZONE II** : PLATFORMING II ; TOPPING III ; HDS ; HDT ; SEPRATION C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub>; CTE I - MEROX - COMPLEXE DES HUILES LUBRIFIANTES;MPE II
- **UPGRADE**

**TOPPING** : Ce sont des unités qui englobent en plus de la colonne de distillation atmosphérique, où s'effectue la séparation des différentes coupes de pétrole brut par vaporisation et condensation fractionnée, des fours pour le préchauffage du pétrole brut ainsi que des colonnes de stabilisation et de splitter.





**PLATFORMING** : C'est une unité de traitement des essences lourdes, adoucie en **HDT** afin d'augmenter leur indice d'octane, ce qui permet l'élévation du taux de compression et l'amélioration du rendement des moteurs à combustion.

**H.D.T** : Unité consiste à un **Hydrotraitement** d'Essence Lourde afin d'éliminer les composés indésirables du Gasoil. Cette unité permet grâce à l'injection d'hydrogène et sous l'action des catalyseurs d'obtenir des produits dont la teneur en soufre est très faible.

**MEROX**: Procédé de purification des produits pétroliers légères « tels que : GPL, Essences, Kérosène » en vue d'éliminer les odeurs désagréables causées par les composés sulfurés ( $H_2S$ , R-SH.) et cela par une réaction d'oxydation des **mercaptans** d'où le nom **anglais MEROX**.

**UPGRADE** : Considéré comme étant la plus grande réalisation que l'industrie nationale du raffinage ait connu depuis la création du complexe SAMIR des huiles lubrifiantes en 1984, le

projet de modernisation de la raffinerie de Mohammedia intègre tous les éléments de la stratégie pétrolière nationale, telle que définie par les Hautes Directives Royales du 4 mai 2004, et englobe les technologies les plus modernes et les procédés les plus performants dans le domaine du raffinage.

Ce projet, qui a démarré en septembre 2005, fait partie intégrante du programme général de modernisation de la raffinerie de Mohammedia, ayant fait l'objet de la Convention d'Investissement signée le 20 décembre 2004 entre le Gouvernement Marocain et la SAMIR. Le budget global y afférent est estimé à plus de 1 milliard de Dollars US.





## Chapitre II : Généralités sur les fours



## I. Généralités <sup>[1]</sup>

Un four est une pièce d'équipement dans laquelle la chaleur dégagée par la combustion de fuel oïl ou gaz combustible par l'intermédiaire de brûleurs, est transféré à un fluide (l'huile chaude par exemple) passant dans des tubes.

Le combustible est brûlé sous des conditions contrôlées dans une chambre appelée : chambre de combustion. La chaleur dégagée est transmise à travers la paroi des tubes au produit. Ces tubes sont placés généralement le long des murs et au plafond du four. Les produits de combustion s'échappent du foyer vers l'atmosphère par l'intermédiaire d'une cheminée.

### I.1. Classification

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

Nous proposons ici deux classifications, en fonction :

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

#### I.1.1. 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.
- Dans un four discontinu, le produit à chauffer est immobile dans le four ; il est chargé et déchargé (enfourné et défourné) au même endroit.

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

- Dans un four continu, un point du four sera toujours (ou à peu près) à la même température.



- Dans un four discontinu la température en un point donné du four évoluera en fonction du cycle de chauffage que l'on veut faire subir au produit.

### I.1.2. Chauffage direct et chauffage indirect

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

- **Fours à chauffage direct** : il ya contact entre les gaz issus de la combustion et les produits à chauffer. du point de vue thermique, cela entraine qu'une partie du transfert de chaleur s'effectue par convection.
- **Fours à chauffage indirect** : l'interaction entre les gaz de combustion et les produits n'existe plus. Par contre, il s'introduit une résistance supplémentaire au transfert de chaleur qui doit se faire par conduction au travers de la paroi protectrice, puis par rayonnement et éventuellement convection vers la charge.

### I.2. Principaux types de fours

Il existe une grande variété de fours tubulaire qui diffèrent notamment par leur géométrie :

- **Les fours cylindriques verticaux** : Dans ces fours, les brûleurs qui sont situés sur la sole du four réalisent le mélange air-combustible et la combustion.

Les flammes se développent dans la zone de radiation dans les tubes sont chauffés par rayonnement. Au sommet de la zone de radiation, la température des gaz de combustion est de l'ordre de 700 à 800°C et de ce fait le rayonnement est plus faible.

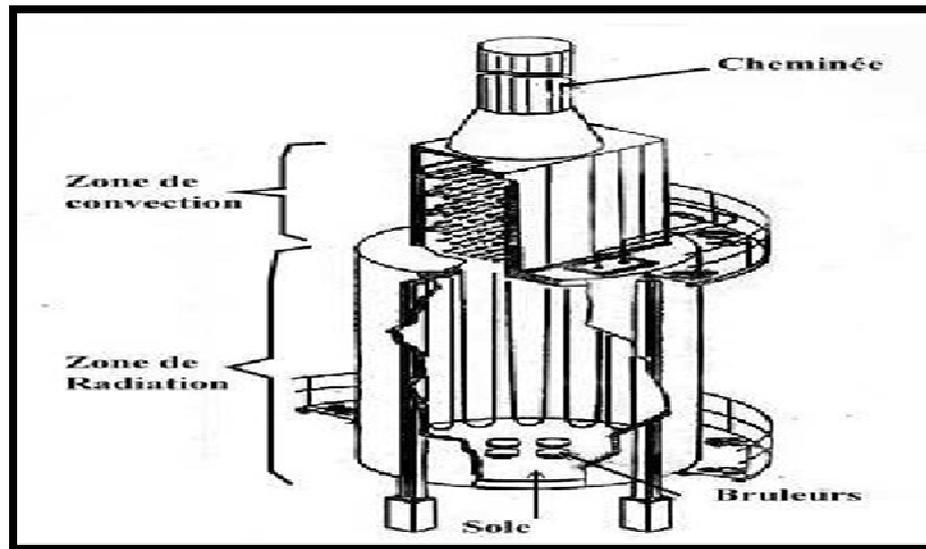


Figure 0: Four cylindrique vertical.

- *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, ou encore sur les murs d'extrémités ne recevant pas les tubes

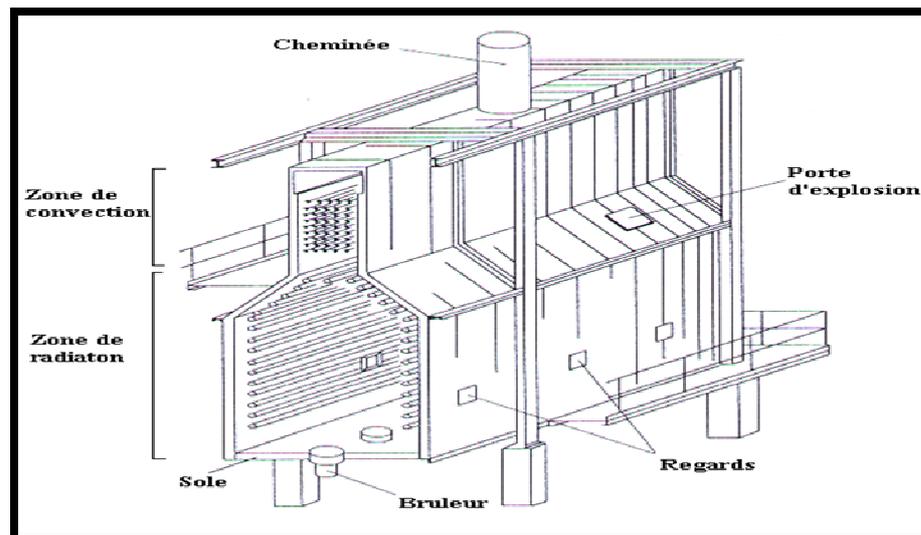


Figure 4 : Les fours dits « cabines » à tubes horizontaux.



### I.3. Les éléments des fours

En général, un four se compose de :

- *Une enveloppe métallique* appelée « casing ».
- *Une zone de rayonnement* formant une chambre de combustion, garnie intérieurement de matériaux réfractaires isolants.
- *Un faisceau tubulaire* en zone de rayonnement et éventuellement en zone de convection.
- *Une zone de convection* éventuellement garnie.
- *Une cheminée* ou un carneau avec registre pouvant être garni (circuit fumées).
- *Des accessoires* divers tels que : souffleurs, portes d'accès, portes d'explosion, regard, thermocouples...

## II. Notions sur les fours <sup>[2]</sup>

### II.1. Définition

La combustion est une réaction chimique rapide exothermique qui se produit au cours de l'oxydation des constituants du combustible par l'agent oxygène pris dans l'air libre en présence d'une flamme. Elle se manifeste par un dégagement de chaleur.

Le combustible est une substance (solide, liquide, ou gazeuse) qui peut se combiner facilement avec l'oxygène selon une réaction chimique. Cette combinaison dite combustion se manifeste généralement par les flammes ou l'incandescence des corps qui brûlent et elle s'accompagne d'un important dégagement de chaleur. Dans la pratique l'oxygène utilisé dans la combustion provient de l'air.

On distingue dans la combustion :

- Combustion neutre : la combustion est neutre lorsque l'air utilisé est en quantité égale à la valeur stœchiométrique. L'oxygène apporté doit théoriquement suffire exactement à assurer une combustion complète (transformation de tout le C en CO<sub>2</sub>), chose qui n'est pas réalisée en pratique.



- Combustion oxydante : réaction chimique qui se fait avec un excès d'air. En pratique, on est obligé d'utiliser une quantité d'air supérieure à la valeur stœchiométrique pour assurer une combustion complète et éviter une perte de combustible.
- Combustion carburante ou réductrice : combustion qui se fait avec un défaut d'air ou une mauvaise atomisation et qui entraîne des pertes de chaleur.
- Le pouvoir comburivore est la quantité d'air nécessaire pour brûler 1 Kg de combustible.
- Le pouvoir fumigène est la quantité de fumées dégagées lors de la combustion d'1 Kg de combustible.
- L'excès d'air : il est défini comme étant la différence entre la quantité d'air utilisée et la valeur stœchiométrique exprimée en (%).

## II.2. Rôle du brûleur

Le brûleur est un appareil destiné à régler une combustion, il a un rôle primordial dans la conception, la construction et le fonctionnement des fours :

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

## II.3. Types du brûleur

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

On distingue :

- Les brûleurs à prémélange.
- Les brûleurs à flamme de diffusion.

### II.3.1. Les brûleurs à prémélange

Le mélange entre le combustible et le comburant se fait préalablement à son introduction dans le four.

Ces brûleurs sont uniquement des brûleurs à combustible gazeux. Ils produisent des flammes courtes et permettent d'obtenir localement des températures très élevées. Des précautions particulières doivent être prises pour éviter la propagation de la combustion, vers l'amont, jusqu'au dispositif de mélange (retour de flamme).

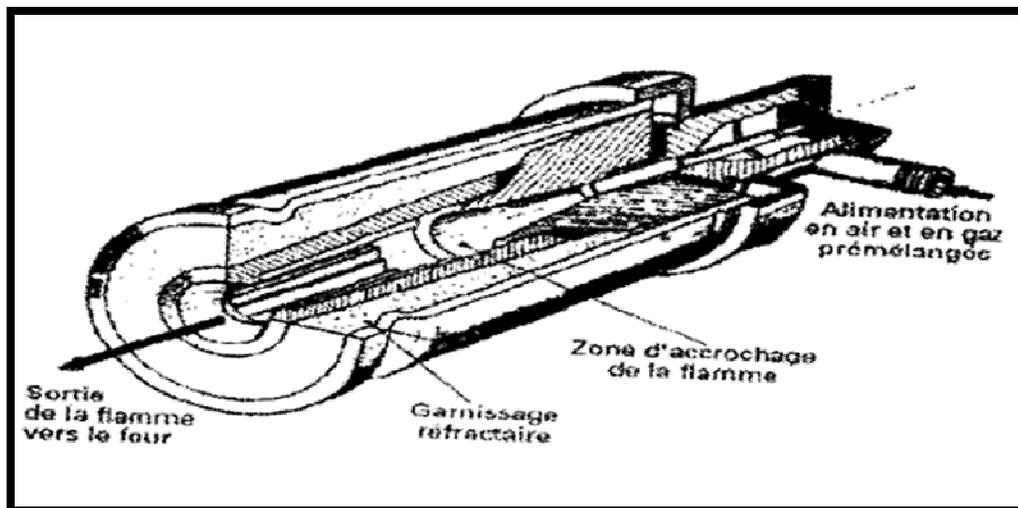


Figure 5: Brûleur à prémélange

### II.3.2. Les brûleurs à flamme de diffusion

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



## Chapitre III : Diagnostic du Four 011F1

## I .Description du four 011F1

Le four 011F1 de Topping 2 est un four cylindrique à serpentins tubulaires, de moyenne capacité (30000 tonnes/jours), utilisé pour le chauffage du pétrole brut qui provient des échangeurs de préchauffages avant de l'acheminer vers la colonne de distillation

Généralement le four se constitue des éléments suivants :

- Les brûleurs : les brûleurs sont situés sur la sole du four, et réalisent le mélange air-combustible pour avoir une combustion complète.
- Une zone de radiation : les flammes se développent dans la zone de radiation, dans laquelle les tubes sont chauffés par rayonnement. Au sommet de la zone de radiation, la température des gaz de combustion est de l'ordre de 700 à 800 °C.
- Une zone de convection : La récupération de la chaleur des fumées est poursuivie dans la zone de convection, fonctionnant comme un échangeur tubulaire. Les fumées refroidies sont évacuées vers l'atmosphère par la cheminée.



Figure 6: Four cylindrique à tubes « 011F1 »



## II. Etude du problème

### II.1 Diagnostic du four actuellement

Le four 011F1 fait parti de Topping 2 qui est une installation de raffinage de pétrole très ancienne, qui date des années soixante, et donc les pertes thermiques sont susceptibles d'être très élevées, que ce soit par les parois ou bien par les fumées, et par conséquence le rendement est faible.

Généralement les pertes par parois sont évaluées par le constructeur de 2% de la chaleur dégagées par le combustible, est tout ce qu'on peut faire pour minimiser les pertes par parois compte sur les opérations de maintenance et de nettoyages quotidiens (ex : le ramonage...).

Il s'avère que les pertes de chaleur par les fumées sont très élevées par rapport aux pertes par parois, donc toute amélioration de rendement sera apporté par une récupération éventuelle de la chaleur dissipée dans l'atmosphère via les fumées.

### II.2 Consommation du combustible

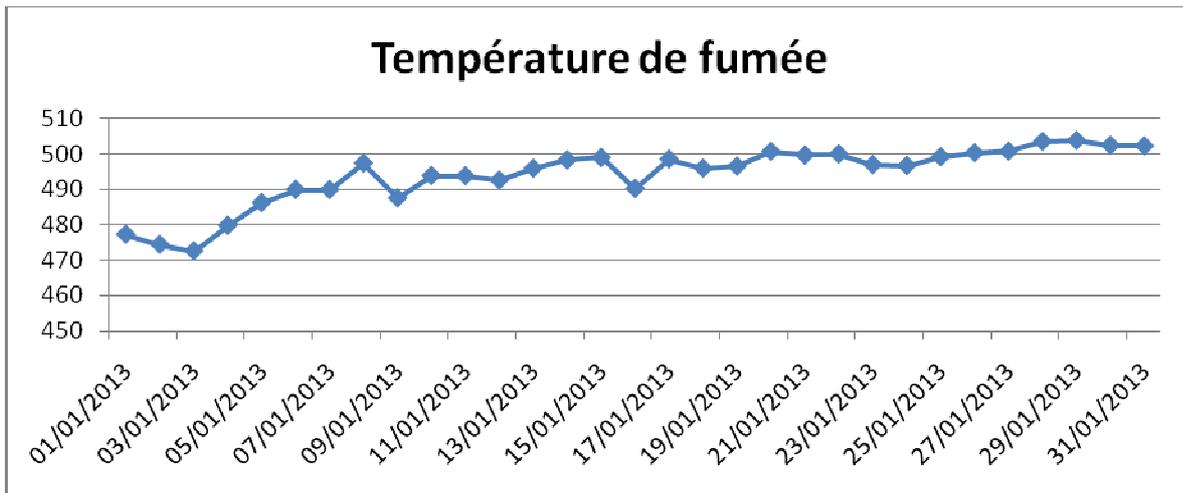
Les pertes thermiques dans le four se traduisent par une augmentation de la consommation du combustible, et donc l'augmentation de la facture énergétique <sup>[3]</sup>.

### II.3 Suivi des températures des fumées

La température des fumées représentent l'un des paramètres clés qui renseignent sur le rendement du four.

La récupération de l'énergie contenue dans les fumées permet une amélioration très importante en ce qui concerne le rendement du four.

La figure ci-dessous représente l'évolution de la température des fumées du four 011F1 pendant le mois de janvier 2013.



**Figure 7: Evolution de la température durant le mois janvier 2013**

- Nous constatons d'après l'analyse de la courbe que la température des fumées oscille autour d'une valeur moyenne de 494 °C.

Une température de 494°C pour les fumées informe sur le fait qu'il y a une énergie thermique importante dissipée dans l'air, notre étude sera consacrée au dimensionnement d'une installation industrielle, qui permettra l'amélioration du rendement du four en récupérant le maximum de chaleur contenue dans les fumées c'est le système du tirage forcé.

#### II.4 Tirage forcé

L'objet du système de tirage forcé est d'améliorer le rendement du four et réduire sa consommation en combustible. Vu que la température de sortie des fumées dans le fonctionnement à tirage naturel est très élevée (494°C), le but de ce nouveau système sera d'abaisser cette température et de la stabiliser à 200°C par récupération de la chaleur à travers un échangeur air comburant-fumée.

La mise au point d'un tel système nécessite de nouvelles composantes afin d'en assurer les bonnes performances. Ainsi, les éléments nécessaires à l'installation sont :

- Tuyauterie pour la circulation du fluide air froid, air chaud.
- Tuyauterie pour la circulation des fumées froides et chaudes.

- Extracteur de fumée
- Echangeur à plaques
- 2 Ventilateurs d'air

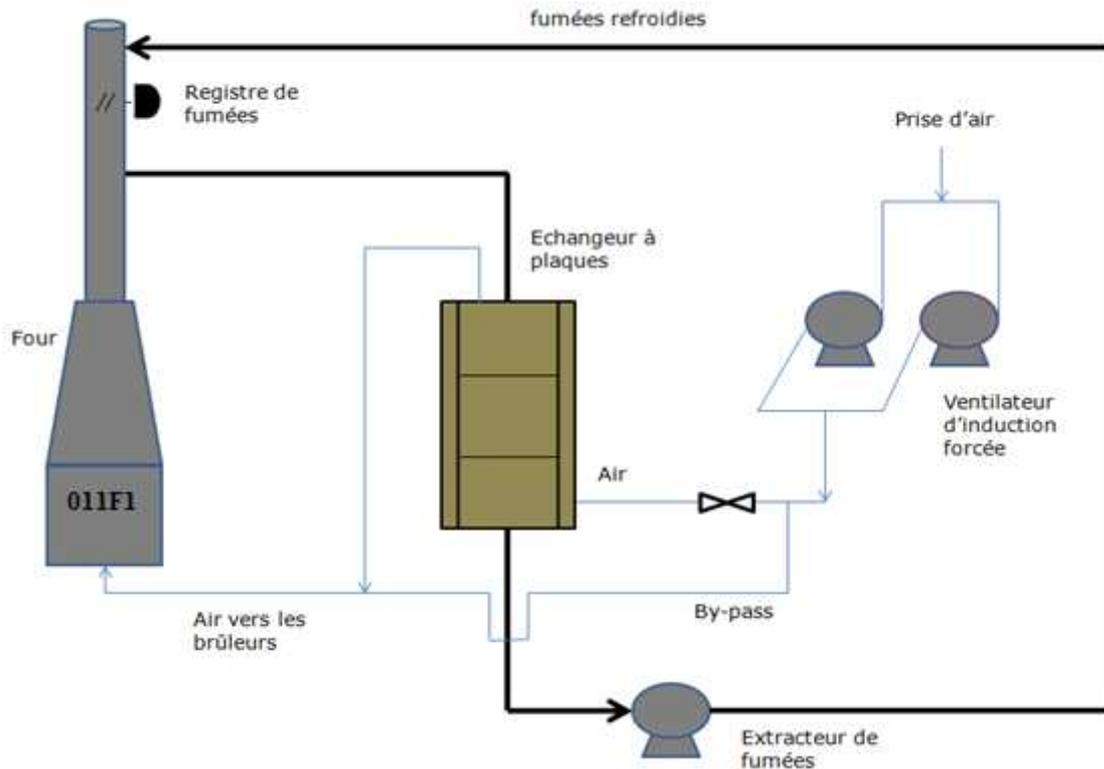


Figure 8: Circuit du système à tirage forcé

### III. Bilan thermique du four 011F1

L'établissement du bilan thermique d'un four a pour but de déterminer son rendement et sa consommation spécifique, c'est-à-dire la consommation rapportée à l'unité utile produite. Cela suppose la connaissance la plus précise possible de tous les flux entrant et sortant du four (matières et produits divers, énergies diverses, etc.) et une bonne interprétation des phénomènes thermiques dont le four est le siège <sup>[3]</sup>.

### III.1 Rendement

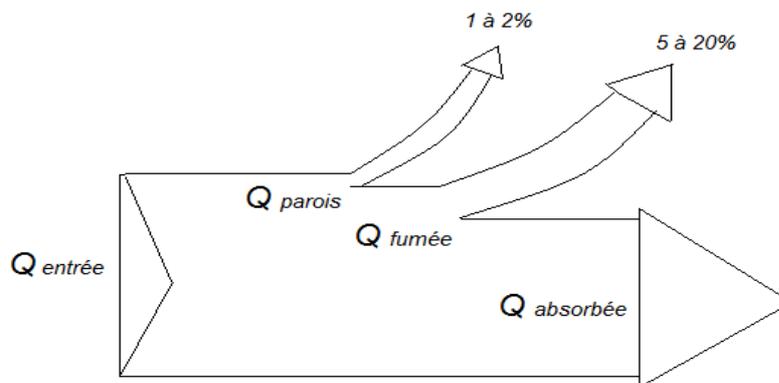
La notion de rendement d'un four apparaît par le fait que le débit de chaleur libérée aux brûleurs par la combustion n'est pas intégralement transmis au fluide procédé. On constate en effet des pertes thermiques qui ont essentiellement deux origines :

- Les pertes par les parois du four sont dues aux imperfections de l'isolation thermique par les matériaux réfractaires. Dans le cas de fours récents, de grande puissance thermique, elles représentent 1 à 2% de chaleur libérée aux brûleurs<sup>[4]</sup>.

Elles peuvent être beaucoup plus importantes dans le cas de fours anciens dont le réfractaire est défectueux.

- Les pertes par les fumées qui évacuent à l'atmosphère un débit de chaleur relativement important représentant en général entre 5 et 20% de celui qui est libéré aux brûleurs<sup>[4]</sup>.

Le diagramme de SNAKE ci-dessous montre les différents flux énergétiques d'un four et permet de mettre en évidence la définition du rendement.



**Figure 9: Le diagramme de SNAKE**

- Le rendement d'un four est défini comme le rapport du débit de chaleur absorbée par le fluide procédé au débit de chaleur fourni au four par la combustion ( $Q_{\text{entrée}}$ )<sup>[4]</sup>

Le calcul du rendement du four par la méthode directe, est donné par la formule :



$$\text{Rendement} = \eta = \frac{Q_{\text{absorbée}}}{Q_{\text{entrée}}} * 100$$

$$\eta = \frac{Q_{\text{absorbée}}}{Q_{f_g} + Q_{f_o} + Q_{\text{vap}} + Q_{\text{air}}} * 100$$

Avec :

- $Q_{\text{absorbée}}$  : La chaleur récupérée par le pétrole brut ;  
 $Q_{\text{air}}$  : La chaleur apportée par l'air de combustion ;  
 $Q_{f_o}$  : La chaleur apportée par le fuel oil ;  
 $Q_{f_g}$  : La chaleur apportée par le fuel gaz ;  
 $Q_{\text{vap}}$  : La chaleur sensible apportée par la vapeur d'atomisation ;  
 $21^{\circ}\text{C}$  : La température de référence ;

Soit encore :

$$\text{Rendement } \eta (\%) = 100 \% - \% \text{ pertes fumées} - \% \text{ pertes parois}$$

Avec :

$$\% \text{ Pertes par fumées}^{[5]} = 0,0375 * \left( \frac{T_{\text{amb}}}{(T_{\text{amb}} - \% O_2)} \right) * (T_f - T_{\text{amb}}) ;$$

$$\% \text{ Pertes par parois} = 2\% ;$$

### 3.1.1 Calcul du Rendement

On observe que le calcul du rendement est plus simple en utilisant la deuxième formule.

$$\eta (\%) = 100\% - 0,0375 * \left( \frac{T_{\text{amb}}}{(T_{\text{amb}} - \% O_2)} \right) * (T_f - T_{\text{amb}}) - 2\%$$

Avec:

$$T_{\text{amb}} : \text{Température ambiante} = 21^{\circ}\text{C} ;$$



$T_f$  : Température de fumée = 494°C ;

% O : Pourcentage d'oxygène = 6% ;

Le rendement actuel du Four 011F1 :

$$\eta (\%) = 73,17\%$$

### III.2 Les pertes de chaleur

On a:

$$\eta_1 * Q_{abs \text{ corrigée}} = \eta * Q_{abs} \quad [14]$$

Donc :

$$Q_{abs} = \frac{\eta_1 * Q_{abs \text{ corrigée}}}{\eta}$$

Avec :

$\eta_1$  : Le rendement avec la température de fumée de design  $T=351^\circ\text{C}$  «80.92%» ;

$Q_{abs \text{ (corrigé)}}$  : La chaleur de design absorbée corrigée ;

$$Q_{abs \text{ (corrigé)}} = 17,5 \cdot 10^6 * 0,8 = 14 \cdot 10^6 \text{ Kcal/h ;}$$

$Q_{abs}$  : La consommation réelle en Kcal/h ;

$$Q_{abs} = \frac{0,8 * 14 * 10^6}{0,73} = 15,43 * 10^6$$

#### Les pertes de chaleur DQ :

$$\Delta Q = Q_{abs} - Q_{abs \text{ corrigée}}$$

$$\Delta Q = 15,43 * 10^6 - 14 * 10^6 = 1,43 * 10^6 \text{ Kcal/h}$$

On a des pertes dans le four qui s'avère à  $1,43 \cdot 10^6$  Kcal/h ce qui nécessite une amélioration du rendement du Four.



Il existe plusieurs voies pour améliorer le rendement énergétique des fours. Dans notre cas, étant donné que les pertes des fumées à 494°C sont la principale cause, la solution la plus évidente est d'exploiter cette chaleur. Ainsi, on optera dans notre étude à l'option du préchauffage de l'air de combustion par cette fumée à travers la disposition d'un échangeur de chaleur.

## I. Généralités sur les systèmes de préchauffage de l'air

L'échangeur de chaleur que nous allons dimensionner jouera le rôle clé pour la récupération de chaleur, en permettant de diminuer la température des fumées de 494°C jusqu'à 200 °C.

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

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

L'implantation d'un système de préchauffage augmente la température de la zone de convection et de radiation, et pour éviter une éventuelle surchauffe des tubes, les supports et d'autres accessoires, il faut prendre en considération tout cela lors de la conception.

## II. Les principaux types d'échangeurs de chaleur

### II.1. Echangeurs tubulaires

Les échangeurs tubulaires représentent encore près de la moitié des échangeurs thermiques vendus en France et en Europe. Ils présentent un certain nombre d'avantages : en particulier ils sont faciles à fabriquer, relativement bon marché, de maintenance aisée et surtout ils peuvent être utilisés à des pressions élevées et à de fortes températures. Leur robustesse et leur fiabilité compensent leur encombrement.

Différentes catégories existent suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée :

- **échangeur monotube**, dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpentin ;
- **échangeur coaxial**, dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur ;
- **échangeur multitubulaire**, existant sous quatre formes :

*Echangeur à tubes séparés* : à l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant (de l'ordre de 100 mm) se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre (8 à 20 mm) maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé ;

*Echangeur à tubes rapprochés* : pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans ;

*Echangeur à tubes ailetés* : ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique ;

*Echangeur à tubes et calandre.*

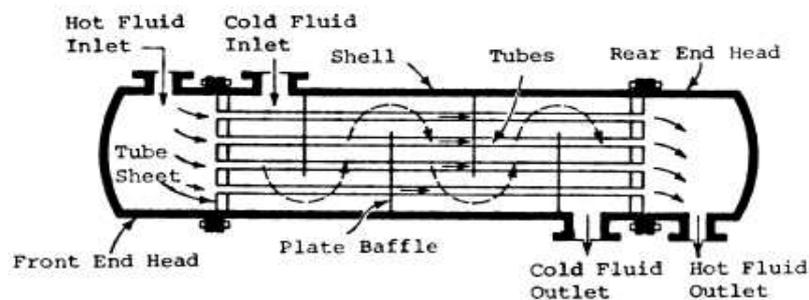


Figure 10: Echangeur tubulaire

## II.2. Echangeurs à plaques

L'échangeur à plaques est un type d'échangeur de chaleur qui connaît un usage croissant dans l'industrie. Il est composé d'un grand nombre de plaques cannelées superposées et séparées les unes des autres par des joints.

Les avantages de ce type d'échangeur résident en sa simplicité, c'est un échangeur peu coûteux et facilement adaptable par ajout/retrait de plaques afin d'augmenter/réduire la surface d'échange en fonction des besoins.

La différence de températures entre les 2 fluides ne doit pas être trop grande également pour éviter une déformation des plaques par dilatation/contraction de ces dernières qui empêcherait les joints entre les plaques d'être parfaitement étanches.

La turbulence permet de réduire l'encrassement de la surface d'échange de 10-25% par rapport à un échangeur à faisceau tubulaire. Comparativement à un échangeur à faisceau tubulaire la surface d'échange est inférieure de 50% pour le même transfert de chaleur.

Ces échangeurs sont préconisés surtout pour les fluides non visqueux.

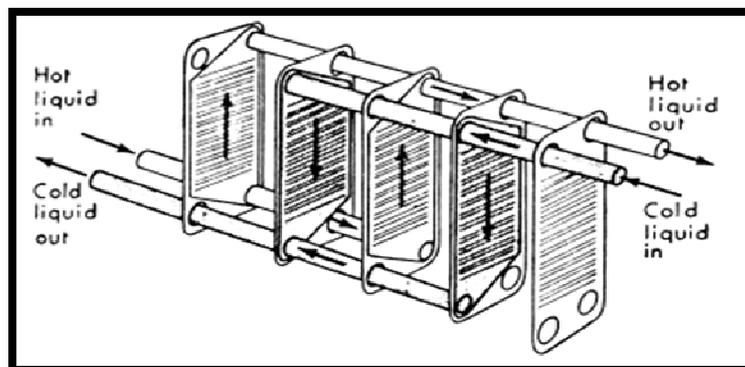


Figure 11: Schéma d'un échangeur à plaques



### III. Types des systèmes de préchauffage de l'air

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

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

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

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

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

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



#### IV. Choix du type de l'échangeur de chaleur

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

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

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

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

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

- Fuite d'air vers les fumées au niveau des joints d'étanchéité.
- Risque d'incendie par inflammation des dépôts.
- Conduite plus délicate.
- Intéressants pour les fours de puissances thermiques importantes supérieurs à 50000 T/h<sup>[4]</sup>.

Pour le secteur pétrolier, le type le plus répondu est l'échangeur récupérateur statique à plaques, considérant la sécurité d'exploitation et le rendement.

L'échangeur de chaleur peut être implanté dans l'installation de préchauffage selon trois alternatives<sup>[1]</sup> :

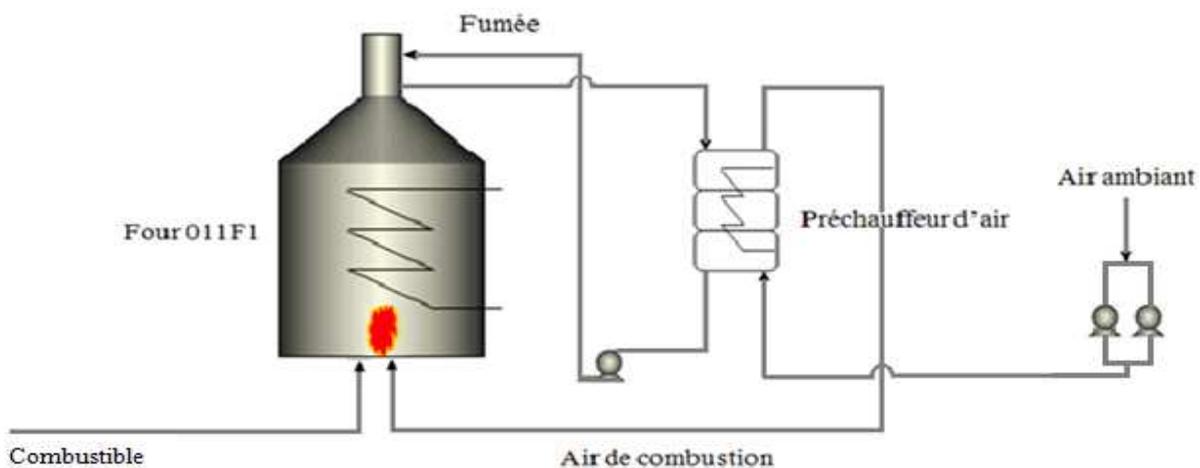
- Système direct de préchauffage de l'air.
- Système indirect de préchauffage de l'air.

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

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

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

Dans notre cas on optera pour le système direct qui est le moins encombrant et surtout le plus répondu et convenable pour les types de fours installés à La SAMIR.



de l'installation de préchauffage.



- Opérabilité du four avec une induction naturelle.
- La surface disponible pour l'installation du système.
- Les températures de conception des fumées.
- La possibilité de nettoyage de l'échangeur avec le minimum d'impact sur la bonne marche du four.
- L'effet négatif des fuites d'air dans le courant des fumées : corrosion, perte de charge, réduction du flux de l'air de combustion.
- La possibilité de produire un flux de radiation à travers la disposition des brûleurs.
- Méthodes possibles pour abaisser la température de rosée sulfurique.
- La contrôlabilité du système et degré de l'automatisation.
- La faisabilité d'étendre l'insensibilité du système de récupération.

## VI. Paramètres de marche de la combustion

L'interaction du four avec le système de préchauffage influe sur les paramètres de conception du four. Dans notre cas où le four existe déjà, on doit conserver la même chaleur absorbée. Donc une révision des paramètres de marche est prévue pour tenir compte des nouvelles conditions <sup>[7]</sup>.

## VII. Ajustement de l'excès de l'air

L'une des considérations importantes pour maximiser le rendement d'un four est le contrôle du flux d'air de combustion et le maintien de cet excès à sa valeur nominale assurant ainsi une combustion complète, stable et des flammes bien définies. Typiquement, un four muni d'un système de préchauffage à tirage équilibré opère à un excès d'air réduit de 10 à 15% par rapport à un système à induction naturelle. Ceci est dû au contrôle avancé et à l'instrumentation <sup>[1]</sup>.

## VIII. Fonctionnement en mode naturel

Pour des raisons économiques, la solution alternative de produire la dépression naturelle est à prendre en considération lors d'une défaillance d'un ventilateur ou de l'échangeur de chaleur.



La plupart des systèmes de préchauffage de l'air ont des registres et des isolations dans leurs systèmes de tuyauterie pour isoler le système de préchauffage en le dotant de la possibilité d'introduire naturellement l'air grâce à la dépression naturelle. Pour le côté fumée, un système de by-pass est à prévoir pour canaliser les fumées directement vers la cheminée. Une autre pratique très utilisée est d'augmenter la fiabilité du système en installant deux ventilateurs pour la redondance.

### **IX. Contrôle de la température froide des fumées**

Pour ne pas limiter la durée de vie normale du récupérateur de chaleur, il est très important d'avoir la possibilité de maintenir la température finale des fumées refroidies au dessus de la température de rosée de l'acide sulfurique durant toutes les conditions d'exploitation, même si les conditions de conception n'impliquent pas la nécessité d'un système de contrôle<sup>[7]</sup>.

On cite ici quelques cas d'exploitation qui requièrent un contrôle de température :

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

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

### **X. Dimensionnement de l'échangeur de chaleur**

L'espace nécessaire pour l'implémentation est fonction du type du système. Le système à tirage équilibré avec une structure d'échangeur indépendante requiert l'espace maximal. Mais grâce à la possibilité d'isoler l'échangeur et les ventilateurs, ce système demeure le plus flexible en termes d'exploitation et de maintenance. Pour les autres types de préchauffage, qui ont simplement soit l'induction forcée soit le tirage forcé, ils requièrent moins d'espace mais au détriment de la flexibilité du système. Comme le four 011F1 a un rôle primordial dans l'unité du Topping2, aucune tolérance n'est acceptée. Alors, on optera pour le système le plus flexible.



## XI. Considérations pour les fuites d'air dans les fumées

Les fuites d'air (les infiltrations) dans le courant des fumées à basse pression est un problème potentiel dans la plupart des échangeurs de préchauffage de l'air. Pourtant, la plupart des constructeurs assure des fuites d'air inférieur à 1% pour les échangeurs de récupération à plaque. Pour les récupérations régénératifs dynamiques, les fuites s'élève à 10% voire 20% si le système n'est pas bien maintenu.

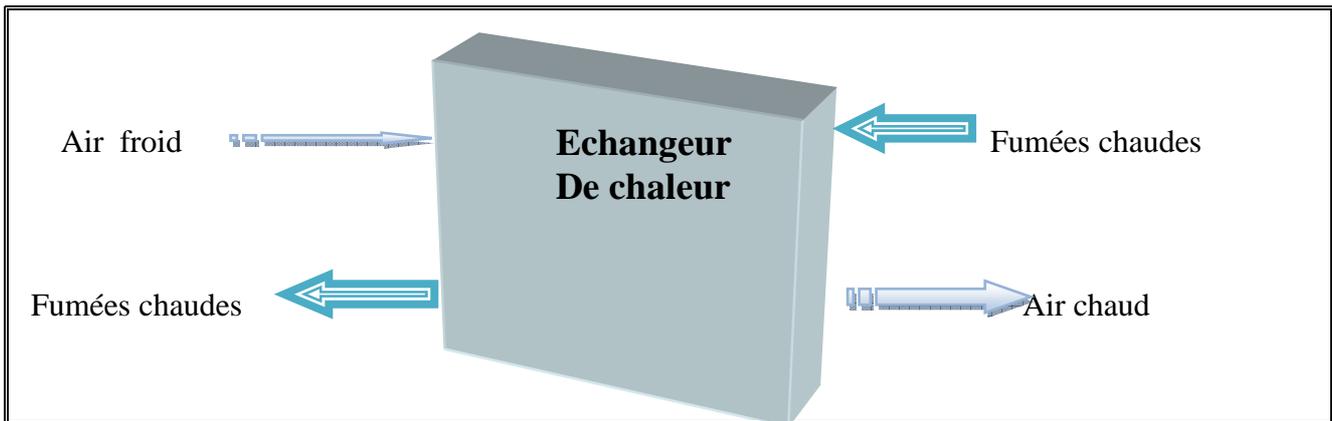
Les effets majeurs des fuites sont :

- La diminution du flux de l'air de combustion, donc on doit justifier le surdimensionnement du ventilateur d'induction forcée.
- L'augmentation du débit des fumées : alors on aura des nouvelles contraintes défavorables pour le ventilateur du tirage forcé qui est censé maintenir la dépression approprié dans le four.
- La nécessité du contrôle de la température des fumées refroidi pour éviter la condensation.

Plusieurs critères sont à considérer pour le dimensionnement d'un échangeur suivant son utilisation.

Deux types de calcul thermique sont envisageables pour la caractérisation de l'échangeur :

- La détermination des températures de sortie des fluides, connaissant leurs températures d'entrée.
- La détermination de la surface d'échange  $S$  connaissant la puissance échangée et les températures d'entrée et de sortie des deux fluides.



### I. Méthode DE DTML <sup>[8]</sup>

La valeur locale de la puissance élémentaire  $d\Phi$  échangée à travers un élément de surface  $dS$  est donnée par l'équation :

$$d\Phi = k(T_1 - T_2) dS$$

Avec  $K$  coefficient d'échange global,  $T_1$  et  $T_2$  températures des fluides  $F_1$  et  $F_2$  de part et d'autre de la paroi.

La surface d'échange totale s'obtient en intégrant l'équation précédente :



$$S = \int \frac{d\Phi}{k(T_1 - T_2)}$$

L'intégration ne peut s'effectuer que pas à pas si l'on connaît l'évolution du coefficient d'échange  $K$  en fonction des températures  $T_1$  et  $T_2$ , dont l'évolution suivant l'écoulement doit elle-même être connue.

Globalement, la surface d'échange ne peut être calculée qu'en admettant les hypothèses suivantes :

- On définit une température moyenne caractéristique ;
- On suppose constant le coefficient d'échange global  $K$  déterminé à la température caractéristique d'échange.

La surface s'obtient par la relation :

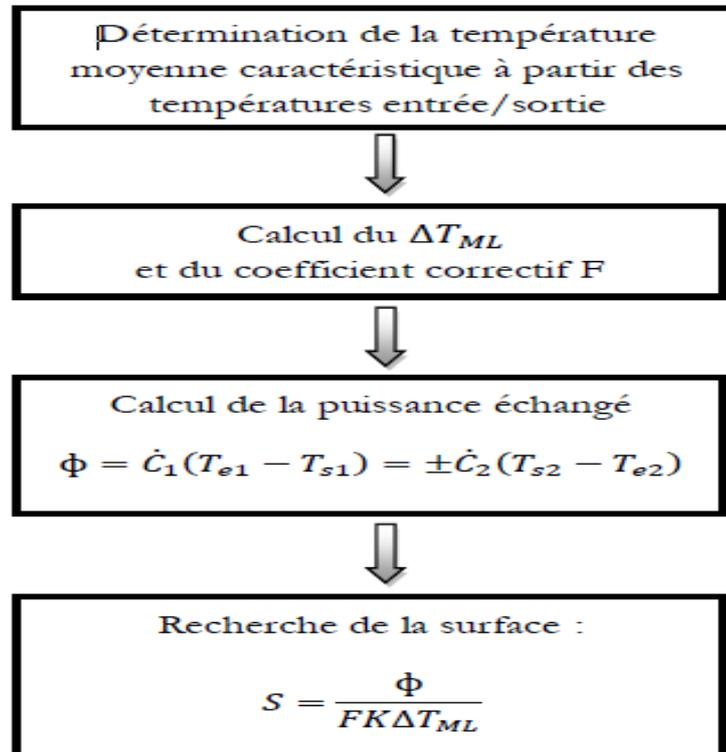
$$S = \frac{\Phi}{K\Delta T_{12}} = \frac{\Phi}{FK\Delta T_{ML}}$$

Avec  $\Delta T_{ML}$  différence moyenne de température entre les deux fluides sur tout l'échangeur.

Logarithmique Dans la pratique, on préfère exprimer cette différence moyenne à partir de la différence moyenne d'un échangeur à contre-courant calculée avec les mêmes températures d'entrée et de sortie des fluides, multipliée par un facteur correctif  $F$ .

Ce facteur correctif  $F$  vaut 1 dans le cas d'un échangeur à contre-courant. Dans certains cas, la solution est analytique mais la formule est complexe, et dépend de l'efficacité  $\epsilon$ . Dans la pratique, on a recours à des abaques pour le calcul de  $F$  et l'on peut se reporter à l'ouvrage de Kern pour la classification suivant les différents modes de circulation ( multipasses, courants croisés, etc.).

- Le déroulement du calcul peut être schématiquement le suivant :



Avec  $\dot{C}_1$  et  $\dot{C}_2$  débits de capacités des deux fluides.

### I.1. Détermination de $\Delta T_{ML}$

$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_{e \text{ fumées}} - T_{s \text{ air}}) - (T_{s \text{ fumées}} - T_{e \text{ air}})}{\ln \frac{(T_{e \text{ fumées}} - T_{s \text{ air}})}{(T_{s \text{ fumées}} - T_{e \text{ air}})}}$$

### I.2. Calcul de $\Delta T_{ML}$

$$\Phi = D_{\text{fumées}} \cdot C_{p \text{ fumées}} (T_{e \text{ fumées}} - T_{s \text{ air}}) = D_{\text{air}} \cdot C_{p \text{ air}} (T_{s \text{ air}} - T_{e \text{ air}})$$

✓ Données :

Chaleur spécifique ( $C_p$  fumées)= 1049,048 J/Kg.K (Annexe I)

Chaleur spécifique ( $C_p$  air)= 1030,854 J/Kg.K

Température de sortie des fumées( $T_s$  fumées)=473 K

Température d'entrée des fumées( $T_e$  fumées)=767 K



Température d'entrée d'air ( $T_{e \text{ air}}$ )=294 K

Débit (D fumées)= 40678,52Kg/h

Débit (D air)=31570 Kg/h

**Remarque :** Les valeurs des débits et des températures sont prises depuis la salle du contrôle de Topping 2 et celle de Cp est obtenu d'après data sheet de l'unité 011.

✓ Calcul :

$$T_{s \text{ air}} = 679,51\text{K}$$

Et :

$$\Delta T_{ML} = 400,84\text{K}$$

### I.3 Calcul de F

F est le **facteur de correction** de la température qui est en fonction de :

$$R = \frac{(T_{e \text{ fumées}} - T_{s \text{ fumées}})}{(T_{s \text{ air}} - T_{e \text{ air}})}$$

ET :

$$P = \frac{(T_{s \text{ air}} - T_{e \text{ air}})}{(T_{e \text{ fumées}} - T_{s \text{ air}})}$$

D'après l'abaque (**Annexe II**) ou la formule, la valeur de facteur de puissance correspondante à  $R = 0.76$  et  $P = 0.71$

$$F = \frac{\frac{\sqrt{R^2 + 1}}{R - 1} \log_{10} \frac{1 - P}{1 - RP}}{\log_{10} \frac{\frac{2}{P} - 1 - R + \sqrt{R^2 + 1}}{\frac{2}{P} - 1 - R - \sqrt{R^2 + 1}}}}$$

$$F = 0,98$$



#### I.4. Calcul de la surface d'échange S

L'expression de la surface d'échange est donné par :

$$S = \frac{\Phi}{FK \Delta T_{ML}}$$

✓ **Données :**

$\Phi$  est le flux échangé en se référant aux fumées chaudes. Le flux est donné par :

$$\Phi = D_{fumées} \cdot C_{p\ fumées} (T_{e\ fumées} - T_{s\ fumées}) = 12555641 \text{ KJ/h}$$

Choix de la valeur du coefficient d'échange globale K, d'après les ordres de grandeurs présentés dans le tableau suivant :

Fluide chaud	Fluide froid	K(Kcal/h.m <sup>2</sup> .°C)
Gaz	Gaz	10-50
Gaz	Liquide visqueux	20-50
Gaz	Liquide peu visqueux	20-80
Liquide visqueux	Gaz	20-50
Liquide peu visqueux	Gaz	20-80
Liquide visqueux	Liquide visqueux	100-200
Liquide visqueux	Liquide peu visqueux	100-300
Liquide peu visqueux	Liquide peu visqueux	700-1800
Vapeur	Liquide visqueux	200-400
Vapeur	Liquide peu visqueux	1000-2000
Vapeur	Liquide en ébullition	700-1501

**Tableau 12: Choix du coefficient d'échange K**

➤ Dans notre cas il s'agit de deux fluides gazeux (air, fumées).

D'où :

<b>K</b>	10	20	30	40	50
----------	----	----	----	----	----



(Kcal/h.m <sup>2</sup> .°C)					
Surface (m <sup>2</sup> )	3196,25	1598,12	1065,41	799,06	639,25

Tableau 13: Calcul de la surface pour les deux fluides (air, fumées)

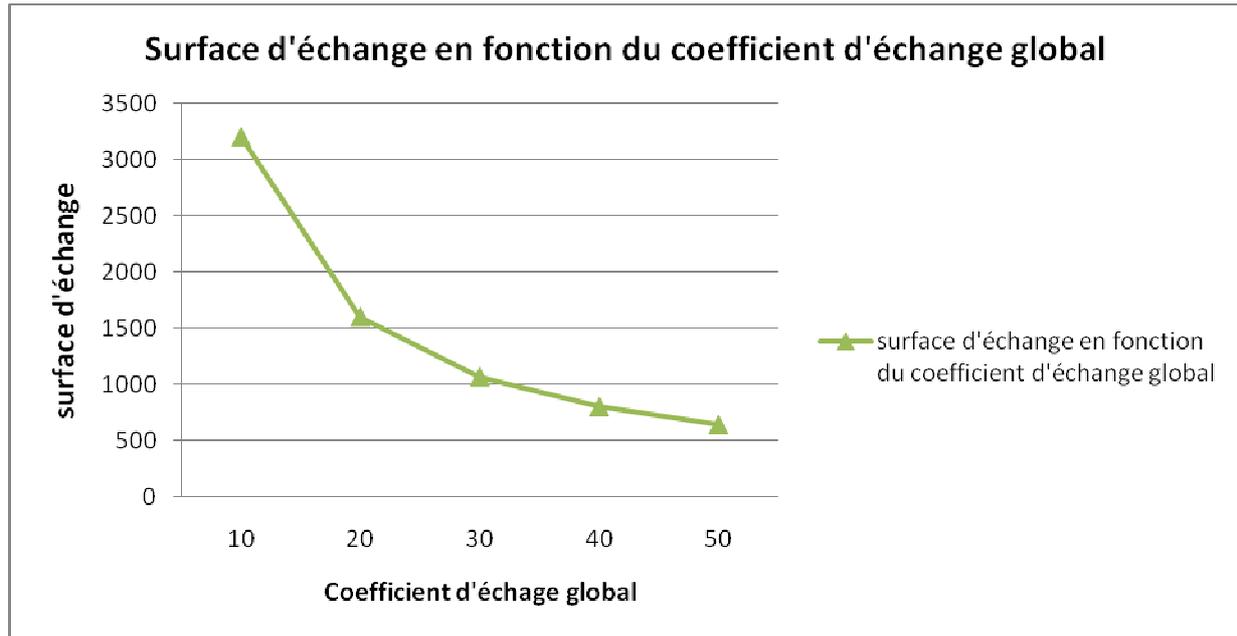


Figure 13: Surface de l'échange en fonction du coefficient d'échange global

- On remarque que la surface d'échange diminue quand le coefficient d'échange augmente, ce qu'est tout à fait normal.

Température d'entrée de la fumée (°C)	494
Température d'entrée de l'air (°C)	21



Température de sortie de la fumée (°C)	200
Température de sortie de l'air (°C)	406,51
$\Delta T_{ML}$ différence moyenne de température entre les deux fluides (°C)	127,84
Flux échangé (KJ/h)	12555641
Coefficient d'échange global (kcal/h m <sup>2</sup> C)	50
Surface d'échange (m <sup>2</sup> )	639,25

Tableau 14:Tableau récapitulatif



## Chapitre VI : Dimensionnement des équipements auxiliaires



## I. Dimensionnement des ventilateurs

Pour compenser les pertes de charge dans le four, et assurer une combustion complète dans les conditions normales de fonctionnement; la conception des ventilateurs constitue une partie très importante dans le dimensionnement de l'installation de récupération de la chaleur.

Le ventilateur centrifuge est le choix le plus approprié pour le cas des installations de récupération de chaleur à tirage forcé.

Le choix d'un ventilateur centrifuge se fait au sein d'une sélection de taille standard selon les besoins aérodynamiques, puis le ventilateur choisi est adapté mécaniquement aux exigences de l'installation.

Si le ventilateur n'est pas correctement adapté aux conditions, cela peut entraîner pour l'exploitation de l'installation une consommation d'énergie et une génération de bruit excessives, voire même des défaillances mécaniques, et de ce fait une perte de bénéfices significative.

Pour réussir un bon dimensionnement des ventilateurs qui vont assurer l'acheminement d'air et des fumées dans l'installation, il faut tenir en compte toutes les pertes et les erreurs de calcul qui peuvent être encourus lors de la phase de la conception.

### c.) Dimensionnement des ventilateurs de l'induction forcée

Le dimensionnement du ventilateur demande la détermination du débit massique qui correspond à la somme des débits suivants :

- L'air de combustion en mode d'exploitation maximal, 100% de la charge ;
- Les fuites d'air nominales dans l'échangeur de récupération de chaleur ;

Le débit d'air (**chapitre V**) reflète le besoin en air de combustion pour les conditions nominales. Pourtant, il est fortement recommandé de multiplier le débit calculé par un facteur de 115% <sup>[1]</sup>. Ce facteur tient compte de :

- Incertitudes dans le calcul de l'air de combustion ;
- Incertitude de la vapeur des fuites d'air dans l'échangeur ;
- Tolérance des courbes opératoires des ventilateurs ;



- Changement dans la composition du fioul ou dans l'excès d'air ;
- Petite tolérance dans les fuites imprévues d'air ;

#### d.) Calcul de la hauteur manométrique des ventilateurs

Pour qu'on puisse avoir une combustion complète dans le four de chauffage, il faut compenser toutes les pertes de charge générées dans le système de récupération de la chaleur majorée de 10% à 15%.

Les pertes de charge se produisent généralement dans les zones suivants :

- L'échangeur air/Fumées ;
- Canalisations des fumées chaudes ;
- Entrée du ventilateur ;
- Canalisation des fumées refroidies entrantes dans la cheminée ;
- Les canalisations entre le ventilateur et l'échangeur.

La pression est calculée en élevant au carré le facteur de majoration de l'air de combustion  $(1,15)^2 = 1,30$ .

#### C.) Calcul de la puissance du ventilateur

Pour calculer la puissance nécessaire assurant une bonne circulation des fluides dans l'installation, On détermine la pression en aval du ventilateur, en utilisant la loi de BERNOULLI selon l'équation suivante<sup>[10]</sup> :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + \Delta H_{perdue} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \Delta H_{ventilateur}$$

On suppose que :

$$Z_1 = Z_2 \text{ et } V_1 = V_2$$

$\Delta H_{perdue}$  : Perte de charge totale du circuit d'air.

$$\Delta H_{ventilateur} = \Delta H_{perdue} - \Delta P_{(T)}$$

- Dimensionnement du ventilateur d'air :

#### Les pertes de charges



Les pertes de charge sont un problème récurrent de la mécanique des fluides surtout dans le domaine des transports de fluide. Physiquement, elles correspondent à une perte de pression dans une canalisation.

➤ **Les pertes linéaires :**

Les pertes de charge dites linéaires qui intervient dans toutes les canalisations à cause de la présence de paroi. On note la perte de charge  $\Delta P_l$ .

On peut calculer ces pertes en utilisant des formules connues ou des abaques de pertes de charges (**Annexe V**).

**Formule de Darcy-Weisbach :**

Perte de pression linéaire dans le cas d'un conduit circulaire <sup>[11]</sup>:

$$\Delta P_l = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho}{2} V^2 \quad [\text{Pa}]$$

$\lambda$  : Coefficient de frottement de Darcy [-] ;

L : Longueur du conduit [m] L= 12m ;

D : Diamètre intérieur du conduit [m] ;

$\rho$  : Masse volumique de l'air [kg/m<sup>3</sup>] ;  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$  ; (**Annexe III**)

V : Vitesse moyenne de l'air [m/s] ;

Pour effectuer ce calcul on doit suivre les étapes suivantes :

- Déterminer La vitesse Maximal en fonction du débit (**Annexe IV**)
- Calculer le diamètre de la canalisation
- Calculer le nombre de Reynolds
- Déterminer la viscosité relative du conduit (**Annexe III**)
- Calculer le coefficient de frottement de Darcy
  
- Calculer la perte de pression linéique



Ta  
ble  
au  
15:  
For  
mu  
les  
util  
isée  
s  
pou  
r le  
cal  
cul  
des

Grandeur	Formule Utilisée	
La vitesse moyenne de l'air $D$ [m/s]	-	7
Le débit d'air $q_v$ [ $m^3/h$ ]	-	26308,3
Le débit d'air $q_v$ [ $m^3/s$ ]	$q_v [m^3/h] = q_v [m^3/h] / 3600$	7,3
Diamètre de la conduite [m]	$D = \sqrt{\frac{4 \cdot q_v}{\pi \cdot v}}$	1,15
Viscosité cinématique $\gamma$ [ $m^2/s$ ]	-	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Nombre de Reynolds $Re$ [-]	$Re = \frac{v \cdot d}{\gamma}$	$5,36 \cdot 10^5$
Coefficient de frottement de Darcy $\lambda$ [-]	$\frac{1}{\lambda 2} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} \right)$	0,98
la perte de charge linéaire [ $mmH_2O$ ]	$\Delta P_l = \lambda \frac{L \rho}{D 2} V^2$	30

pertes linéaires (ventilateur d'air).

✓ Calcul :

- Diamètre de la conduite :

$$q_v = v \cdot s = v \cdot \frac{\pi D^2}{4}$$

Avec : Le débit d'air

Débit massique :  $q_v = 31570 \text{ Kg/h}$  , débit volumique :  $q_m = 26308 \text{ m}^3/\text{h}$ ;

**$D = 1,15\text{m}$ ;**

- Nombre de Reynolds ( $Re$ ) =  $\frac{v \cdot d}{\gamma} = 5,36 \cdot 10^5$ ;

Avec : la rugosité relative  $\gamma = 1,5 \cdot 10^{-5}$

- Coefficient de frottement de Darcy  $\lambda = -2 \log \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d}$  ;

Avec rugosité absolue de la paroi interne du conduit  $\varepsilon = 1,3$

**$\lambda = 0,98$**



- les pertes de pression linéaire :

$$\Delta P_l = 30 \text{ mmH}_2\text{O}$$

Soit :  $1 \text{ Pa} = 0,1 \text{ mmH}_2\text{O}$

Le millimètre d'eau ( $\text{mmH}_2\text{O}$ ) est défini comme la pression exercée à la base d'une colonne d'eau exactement de 1 millimètre (mm) de hauteur, et la densité du fluide est exactement 1,004514556 gramme par centimètre cube ( $\text{g} / \text{cm}^3$ ), dans un emplacement physique où l'accélération de la pesanteur est exactement  $9,80665 \text{ m} / \text{s}^2$  [12].

### ➤ Les pertes singulières

Les pertes de charge singulière qui interviennent lors d'un changement de géométrie de la canalisation réf [7].

$$\Delta P_s = \zeta \frac{\rho}{2} V^2 \quad [\text{Pa}]$$

$\Delta P_s$  : Perte de pression singulière [Pa] ;

$\zeta$  : Coefficient de perte de pression singulière de l'élément considéré [-]  $\zeta = 0,3$  ;

$\rho$  : Masse volumique de l'air [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  $\rho = 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$  ;

$V$  : Vitesse Maximal [m/s]  $V = 7 \text{ m/s}$ ;

$$\Delta P_s = 0,88 \text{ mmH}_2\text{O}$$

### ➤ Les pertes par l'échangeur de chaleur :

Les pertes au sein de l'échangeur sont évaluées par le constructeur de l'échangeur « RIZZI ENGINEERING ».

$$\Delta P_1 = 107 \text{ mmH}_2\text{O}$$

### ➤ Les pertes dans le bruleur du four :

$$\Delta P_b = 65 \text{ mmH}_2\text{O}$$

### ➤ La dépression due à la différence de température :



$$\Delta P(T) = 16,2 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$\begin{aligned}\Delta H_{\text{ventilateur}} &= \Delta H_{\text{perdue}} - \Delta P_{(T)} \\ \Delta H_{\text{ventilateur}} &= 1,3 * (\Delta P_l + \Delta P_s + \Delta P_1 + \Delta P_b) - \Delta P_{(T)} \\ \Delta H_{\text{ventilateur}} &= 1,3 * (30 + 0,88 + 107 + 65 - 16,5) \\ \Delta H_{\text{ventilateur}} &= 242,29 \text{ mmH}_2\text{O} \\ \Delta H_{\text{ventilateur}} &= 0,24 \text{ mH}_2\text{O}\end{aligned}$$

La puissance du ventilateur d'air est donné par :

$$p = 1,15 * g * \Delta H_{\text{ventilateur}} * D_{\text{air}}$$

Ou  $D_{\text{air}}$  est le débit massique d'air de combustion.

La puissance utile du ventilateur est donnée par :

$$p = 85,39 \text{ KW}$$

Sachant que le rendement du moteur :

$$\eta = \frac{\text{la puissance absorbée}}{\text{la puissance utile}} = 90\%$$

La puissance absorbé par l'arbre est de :

$$p = 76,85 \text{ KW}$$

## II. Dimensionnement de l'extracteur des fumées



➤ Les pertes linéaires

Grandeur	Formule Utilisée	
Vitesse maximal da la fumée [m/s]	-	7
Le débit d'air $q_v$ [ $m^3/h$ ]	-	27118,6
Le débit d'air $q_v$ [ $m^3/s$ ]	$q_v [m^3/h] = q_v [m^3/h] / 3600$	7,53
Diamètre de la conduite de la fumée [m]	$D = \sqrt{\frac{4 \cdot q_v}{\pi \cdot v}}$	1,17
Viscosité cinématique $\gamma$ [ $m^2/s$ ]	-	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Nombre de Reynolds Re [-]	$Re = \frac{v \cdot d}{\gamma}$	$5,46 \cdot 10^5$
Coefficient de frottement de Darcy $\lambda$ [-]	$\frac{1}{\lambda 2} = -2 \log\left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D}\right)$	0,98
la perte de charge linéaire [ $mmH_2O$ ]	$\Delta P_l = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho}{2} v^2$	<b>46,17</b>

Table  
au 16  
:  
Form  
ules  
utilisé  
es  
pour  
le  
calcul  
e des  
pertes

**linéaires ( extracteur des fumées)**

Avec :

- Longueur du conduit [m] :  $L=15m$  ;
- Masse volumique de la fumée [ $kg/m^3$ ] :  $\rho= 1,5 kg/m^3$  ;

$$\Delta P_l = 46,17 \text{ mmH}_2\text{O}$$

➤ Les pertes singulières :

$$\Delta P_s = 1,1 \text{ mmH}_2\text{O}$$

➤ Les pertes par l'échangeur de chaleur :

$$\Delta P_1 = 105 \text{ mmH}_2\text{O}$$

➤ La dépression due à la différence de température :



$$\Delta P_1 = 17 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$\Delta H_{\text{ventilateur}} = \Delta H_{\text{perdue}} - \Delta P_{(T)}$$

$$\Delta H_{\text{ventilateur}} = 1,3 * (46,17 + 1,1 + 105 - 17)$$

$$\Delta H_{\text{ventilateur}} = 180,42 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$\Delta H_{\text{ventilateur}} = 0,18 \text{ mH}_2\text{O}$$

La puissance du ventilateur d'air est donné par :

$$p = 1,15 * g * \Delta H_{\text{ventilateur}} * D_{\text{fumée}}$$

Ou  $D_{\text{fumée}}$  est le débit massique de la fumée.

La puissance utile du ventilateur est donnée par

$$p = 82,51 \text{ KW}$$

Sachant que le rendement du moteur est de 90%, La puissance absorbé par l'arbre est de :

$$p = 74,25 \text{ KW}$$

### III. Dimensionnement des bruleurs

Le brûleur est l'organe essentiel du four qui permet le contrôle de la chaleur fournie, et donc pour éviter tout gaspillage éventuel d'énergie thermique. Il faut se concentrer sur trois axes principaux lors du dimensionnement des brûleurs :

- Le brûleur doit être muni d'une source d'inflammabilité stable et renouvelable ;
- Le brûleur doit contrôler le mélange des réactifs, le combustible et l'agent oxydant ;
- Le brûleur doit être conçu pour une région de réaction contrôlable, c'est-à-dire la forme de la flamme doit être contrôlée pour une propagation uniforme d'énergie.

L'amélioration des procédés industriels ainsi que les différentes machines thermiques a permis de contribuer au perfectionnement des brûleurs qui doivent garantir une exploitation stable. En plus, on ne doit pas dépasser les limites maximales des émissions polluantes engendrées lors du processus de la combustion.



On peut classer les brûleurs en deux catégories selon la pression d'air à l'admission :

- L'air à une pression négative (induction naturelle).
- L'air à une pression positive (induction forcée).

Pour notre cas, l'utilisation d'un système de préchauffage nécessite l'option de l'induction forcée, alors que les brûleurs installés dans le four 011F1 est du type induction naturelle.

Le four 011F1 est muni de 9 brûleurs, la chaleur dégagée par chaque brûleur est de l'ordre de  $1,47 \cdot 10^6$  Kcal/h.

Le constructeur fournit une courbe qui informe sur la taille du brûleur en fonction des pertes de charge et de la chaleur libérée. Les brûleurs sont paramétrés sur une fourchette de chaleur libérée suivant les normes de chaque constructeur.

Pour le four 011F1 :

- La chaleur dégagée par chaque brûleur est de  **$1,4710^6$  Kcal/h.**
- L'excès d'air de design du four est de **30%**.
- La température d'entrée d'air devient  **$406,51^\circ\text{C}$**  avec la nouvelle configuration.

Les pertes de charge de l'air à l'entrée des brûleurs sont en fonction de la chaleur libérée, pour satisfaire à toutes les conditions d'exploitation, on considère les pertes au cas le plus défavorable.

Pour le cas des brûleurs à induction forcée les pertes de charge sont de l'ordre de  **$65\text{mmH}_2\text{O}$**  <sup>[7]</sup>.

#### IV. Calorifugeage

Le but de l'installation dimensionnée est de minimiser les pertes de chaleur qui se produisent au niveau du four pour augmenter le rendement. Or, dans l'installation on peut avoir des pertes thermiques importantes, au niveau des conduites.

Pour que le système puisse opérer avec des pertes de chaleur acceptables, il faut modéliser le phénomène de transfert de chaleur. On peut proposer, pour réduire les pertes d'énergie dans l'installation de la récupération de chaleur un système de calorifugeage.

Pour la canalisation, on peut distinguer deux types de calorifugeage :

##### c) Calorifugeage des conduites d'air :



---

Les conduites de l'air sont en acier ordinaire de conductivité thermique  $46,39 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ .

On utilisera comme matière de calorifugeage la laine de verre avec une conductivité thermique très faible de  $0,04 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  et une épaisseur de 10mm.

**d) Calorifugeage des conduites des fumées :**

Les conduites de l'air sont aussi en acier ordinaire de conductivité thermique  $46,39 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ .

Pour l'isolation des conduites des fumées on utilise le béton réfractaire sa conductivité thermique est de  $0,10 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  et avec une épaisseur de 18mm.



## Chapitre VII : Régulation du Four 011F1



## I .But de régulation

L'étude de régulation du Four à un rôle primordial pour :

- Protéger l'environnement ;
- Augmenter le rendement du four ;
- Eviter l'encrassement des équipements intérieur du Four ;

Le problème majeur réside à éviter la pollution. En effet, le four éjecte de la fumée noire si le débit de combustible est grand par rapport au débit de l'air, et aussi éjecte de la fumée blanche dans le cas inverse.

De plus la fumée noire éjectée par le four crée une couche solide qui sulfurise les tubes de ce dernier, ce qui rend le chauffage des produits difficile et prend plus de temps, ceci influence le rendement et la fiabilité.

A cela s'ajoute le problème de pouvoir calorifique de fuel gaz, on sait bien que le fuel gaz dont le pouvoir calorifique est variable, alors que le chauffage de ce dernier est instable.

Et en termes de sécurité à ce niveau on remarque qu'on n'a pas la main de réagir sur la pression en aval des combustibles, ce qui réagit d'une façon mauvaise sur la pression intérieure du four, ceci pourra entraîner les employés dans des dangers fatales.

## II .Outils utilisés

Le système de contrôle commande intégré utilisé à la raffinerie SAMIR, est conçu par la société YOKOGAWA. Il s'adresse aux applications moyennes ou importantes, et destiné à la gestion et au contrôle dans différents domaines industriels : raffinage, pétrochimie, pharmacie, industries alimentaires, pâtes et papiers, aciers et métaux non ferreux, ciment, énergie, gaz, eau et eaux usées.



YOKOGAWA a conçu ce qu'on appelle le Système de Contrôle Intégré (ICS). Il intègre les dernières technologies, sur une architecture ouverte, modulaire. Cette architecture est utilisée essentiellement dans le domaine industriel pour assurer la supervision et la surveillance d'installation technique, comme :

- Supervision de production pétrolière ou gazière
- Gestion de stockage
- Supervision de production
- Gestion de trafic
- Supervision de distribution et de traitement d'eau
- Supervision et gestion de l'énergie
- Supervision des sites...

Le point fort de ce système est qu'il ne permet pas la séparation entre la partie régulation du procédé et la sécurité de l'ensemble du système.

Ce système est constitué de deux niveaux, niveau de supervision et niveau contrôle-commande.

## II.1 Niveau de supervision

A ce niveau, on trouve le HIS (Poste Opérateur) et le EWS (Poste Ingénieur) qui est destiné à la configuration du système avec le logiciel Centum CS3000.

Le système CS3000 est un Système Numérique de Contrôle et de Commande (SNCC) distribué, souple. Il concrétise le concept de solutions intégrées destiné à la gestion et au contrôle des moyennes et grandes applications industrielles.

Les principes de base du système CS3000 sont :



- Performance d'un vrai système numérique de contrôle commande (SNCC) de PC : le système Centum CS3000 associe la souplesse et la fiabilité de ses prédécesseurs

de la famille Centum. Doté d'une architecture souple, il est conçu pour s'adapter aux systèmes déjà implantés.

- un système ouvert, construit autour de Windows 2000 : Organisé autour du système d'exploitation Windows 2000, le Centum CS3000 offre un environnement ouvert et un accès facile à toutes les données du procédé.
- Accès aux autres applications de Windows 2000 : la visualisation des fenêtres d'exploitation n'empêche pas l'accès simultané à toutes données du procédé.

## II.2 Niveau de contrôle- commande

La partie contrôle est divisée en trois sous-systèmes: le ESD, DCS et le FGS. Chaque système a un rôle bien déterminé :

### II.2.1 Système de contrôle distribue (DCS)

C'est le niveau où le traitement des données se fait suivant des algorithmes de régulation et de contrôle séquentiel programmés et stockés dans des unités de traitement appelés FCU (Field Control Unit) qui sont reliées entre elles via le bus de communication Vnet. L'ensemble des FCU et Nœuds constituent la station de contrôle FCS (Field Control System), alors c'est quoi FCS ?

FCS réalise des fonctions de contrôle continu ou séquentiel ainsi que des fonctions programmables par l'utilisateur avec un temps de cycle configurable 200 ms, 500 ms ou 1s. Il réalise les fonctions suivantes :

- Fonction de contrôle : telles que les fonctions de régulation, de calcul et de contrôle séquentiel.
- Intégration des sous-systèmes : possibilité d'intégration des sous-systèmes en utilisant les interfaces standards (RS-232 et RS-485) et des logiciels de communications compatibles avec les sous-systèmes des principaux fabricants.
- Liaison avec l'instrumentation : possibilité de communiquer avec les instruments de terrain en utilisant soit des modules d'entrées/Sorties déportés, soit un bus de terrain.



### II.2.2 L'automate de sécurité (ESD)

L'ESD est un système automatisé qui intègre un très grand niveau de sécurité. Il est traditionnellement utilisé dans les zones présentant un haut niveau de risque.

Ce type de systèmes est à base d'automates de sécurité Prosafe ayant un temps cycle très rapide afin de détecter toutes les anomalies apparaissant durant le fonctionnement et de pouvoir réagir en temps réel. Il est conçu principalement pour la gestion des sécurités et des arrêts d'urgence ainsi que les séquences de démarrage.

PROSAFE est le diminutif de « programmable safety systems » qui comprend une gamme complète de produits dédiés aux fonctions de sécurité tant pour les fonctions d'arrêt d'urgence que pour les fonctions de protection contre le feu et le gaz.

### II.2.3 Système de détection feu et gaz (FGS)

Le FGS est un système de détection de feu et de gaz à base d'un système d'alarme. Pour assurer ces fonctions, il est nécessaire d'utiliser des automates de sécurité à scrutation rapide comme les automates Prosafe APACS+.

Ce système permet les fonctions suivantes :

- Détection des Hydrocarbures.
- Détection des Hydrogènes.
- Détection de l'Acide Sulfurique H<sub>2</sub>S.
- Détection des fumées
- Détection de toutes sortes de gaz nuisible à la présence humaine.

## II.3. Les réseaux de communication

La société YOKOGAWA dispose d'un certain nombre de réseaux, comme Vnet, ce réseau est propriétaire à lui, ce qui facilite sa configuration et son intégration dans les systèmes automatisés, elle utilise aussi le réseau Ethernet (LAN) ainsi que le protocole HART pour communiquer entre capteurs et terrain. Alors qu'elles sont les caractéristiques de chacun ?



### II.3.1 Ethernet

L'Ethernet assure le dialogue horizontal entre les HIS, ainsi il lie les HIS aux autres équipements informatiques comme les imprimantes. Ce réseau est destiné à :

- Télécharger la base de données du projet depuis l'HIS-EWS dans les autres HIS.
- Echange des données historiques entre HIS.
- Permettre le partage de ressources (imprimante) entre HIS.

Ce bus assure la communication à une vitesse de 10 ou 100 Mbps (suivant les types de câbles).

La longueur maximale de transmission par câble coaxial entre deux répéteurs est 185m.

### II.3.2 Le réseau Vnet

Le réseau Vnet est un réseau de contrôle en temps réel reliant les stations de contrôles FCS entre elles et avec d'autres stations telles que les PC et les équipements de communication.

Le bus Vnet réalise des fonctions de communication à vitesse égale à 10Mbits /s en utilisant un système d'émission en diffusion un jeton tournant.

Le réseau Vnet est destinée à :

- Télécharger les configurations des FCS depuis les stations de configuration : EWS
- Echanger les données entre les FCS.
- Echanger les données entre les FCS et les stations de supervision HIS et de configuration EWS.

### II.3.3 L'architecture de base :

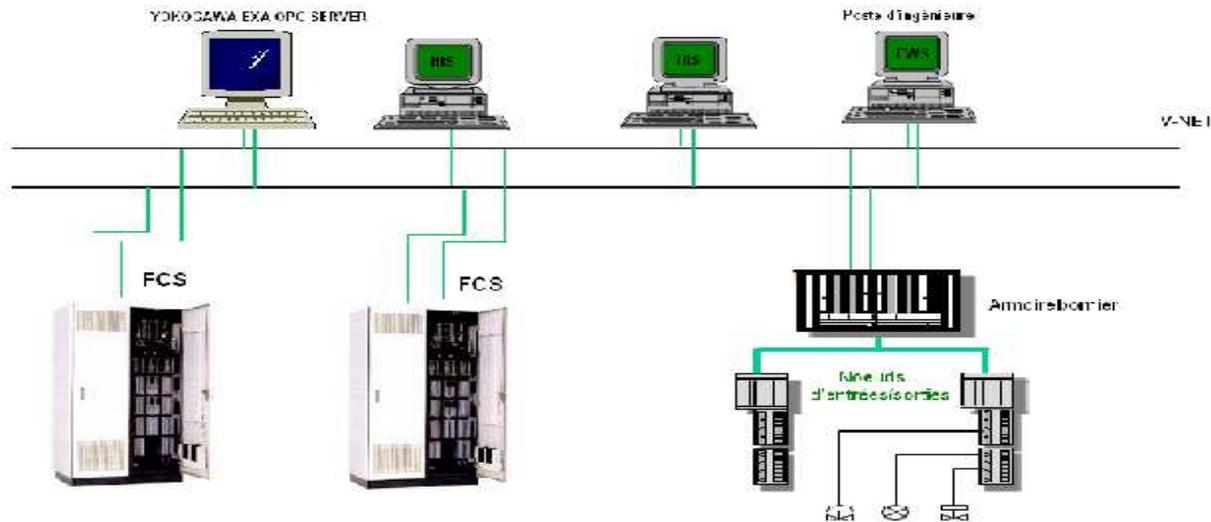


Figure 14 : Structure de liaison des différents composants de l'environnement YOKOGAWA.

## III. Description de la régulation

### III .1 Mode de fonctionnement

La charge (brut) entre dans le four 011F1 par 4 passes en parallèle, équipées de contrôle de débit. La charge portée à la température désirée entre dans la tour.

Les brûleurs multi-combustibles du four sont alimentés en :

- air comburant dont le débit est en kg/h (par tirage naturel).
- fuel gaz dont le débit massique est en kg/h.
- fuel oil dont le débit massique est en kg/h, est obtenu par différence entre le débit total entrant et le débit retour.

### III.2 Principe de fonctionnement de l'ancienne chaîne de régulation

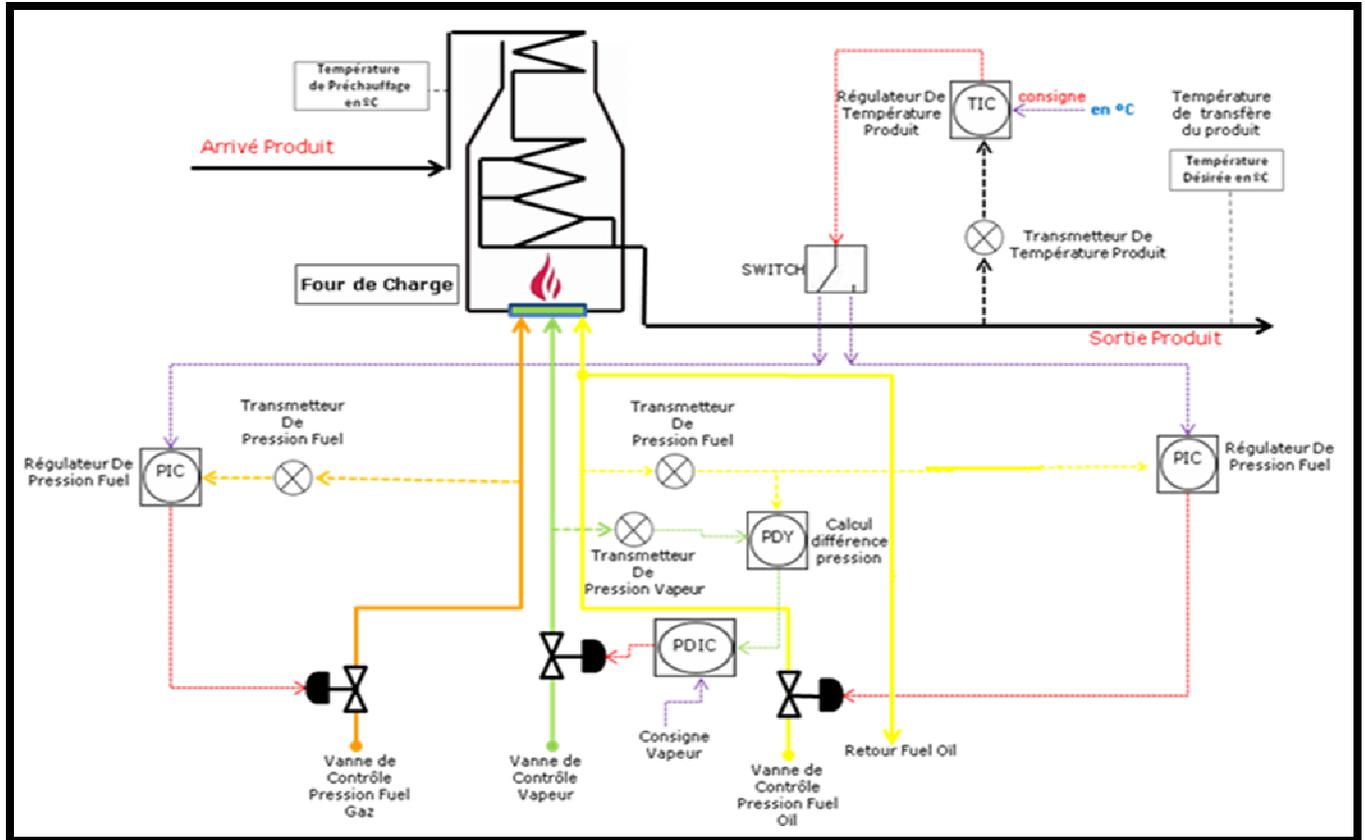


Figure 15 : Chaîne de régulation avec tirage naturel

Dans cette chaîne de régulation on mesure la température de produit à la sortie du four par un transmetteur de température (TT), et on la compare avec la consigne désirée par un régulateur de température (TIC) qui nous délivrera un signal de correction.

Ce signal de correction est envoyé comme consigne par l'intermédiaire d'un SWITCH au régulateur de pression (PIC) de fuel oil ou de fuel gaz.

En cas de sélection du PIC du fuel Gaz (régulateur de pression en cascade), il compare la consigne externe arrivée du régulateur TIC, avec la mesure qui est délivrée par un transmetteur de pression (PT), et calcule le signal de correction qui va commander l'ouverture de la vanne

a fin d'ajouter le combustible pour augmenter la chaleur, ou la fermeture de cette dernière pour arrêter le combustible et diminuer la température.



De même dans le cas de sélection du PIC du fuel Oil (régulateur de pression en cascade), il compare la consigne qui vient du SWITCH avec la sortie du bloc de calcul (FY). Ce bloc fait la différence entre le débit fuel oil à la sortie de la vanne et le débit retour de ce dernier afin de déterminer le débit réel qui est consommé par le four.

Or pour la vanne de vapeur elle est commandée par un régulateur de différence de pression (PDIC). Ce régulateur compare la consigne désirée avec la sortie du bloc de calcul (PDY) qui fait la différence entre la pression de la vapeur et la pression de fuel oil.

### III.3 Analyse critique

Tout au long de cette étude, nous avons constaté des faiblesses qui pourront influencer sur le rendement, la qualité et l'environnement. De cet angle, nous avons résumé les principales causes :

- ✓ **Problème de pollution** : le four éjecte de la fumée noire si le débit de combustible est grand par rapport au débit de l'air, et aussi éjecte de la fumée blanche dans le cas inverse. Dans cette boucle de régulation l'air est en tirage naturel par l'intermédiaire de ce qu'on appelle les registres d'air.
- ✓ **Problème de rendement et de fiabilité** : la fumée noire éjectée par la combustion crée une couche solide qui sulfurise les tubes du four, ce qui rend le chauffage des produits difficile et prend plus de temps.
- ✓ **Problème de perte d'énergie** : Pour augmenter la rentabilité du four il est préférable de consommer du fuel gaz que du fuel oil.
- ✓ **Problème de sécurité** : Le bon fonctionnement du four en pleine sécurité nécessite le contrôle de la pression de la combustion.

## IV. Amélioration de la régulation du débit d'air préchauffé

Comme toute entreprise la SAMIR cherche à augmenter le rendement de sa production et réduire sa consommation en combustible pour se faire on a utilisé le système 'Tirage forcé' qui se fonde sur l'automatique et qui va assurer le développement de l'unité.

### IV.1 Description de la régulation avec tirage forcé

Pour résoudre ce problème il faut un moyen pour contrôler la quantité d'air qui entre dans le four. Pour cela il faut installer deux extracteurs d'air commandés par un régulateur PID pour la mise en circulation de l'air au four. L'organigramme suivant présente le principe de commande de la solution :

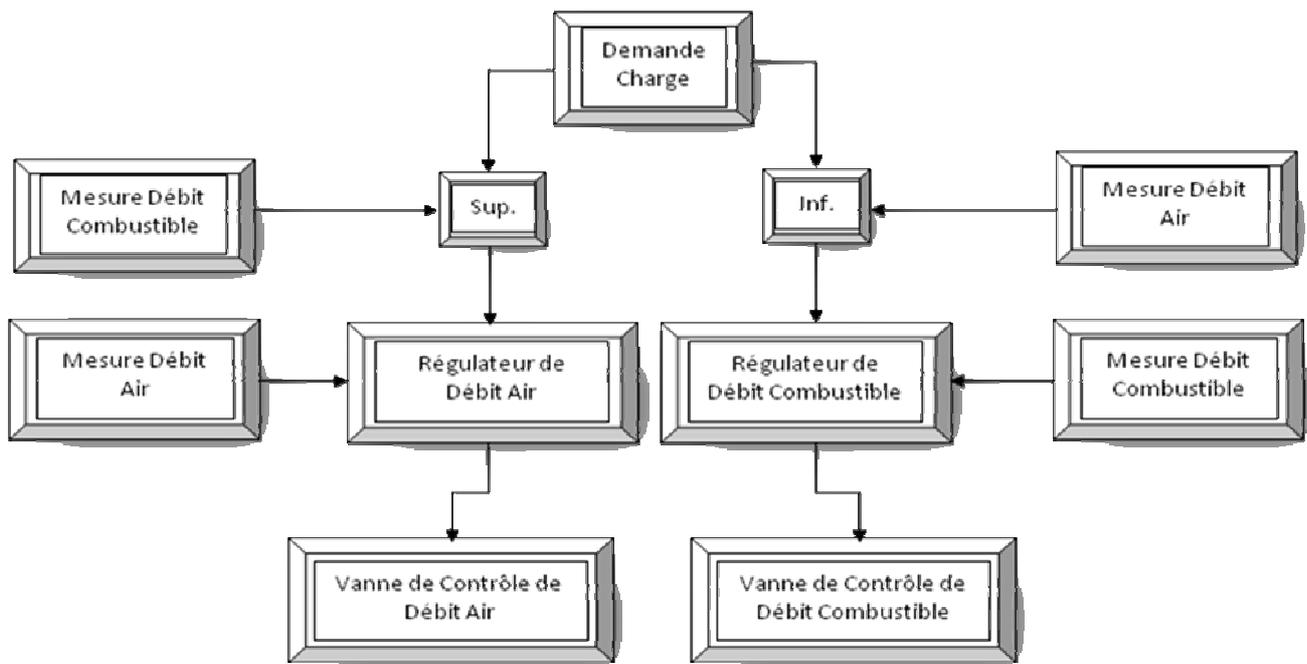


Figure 16:Le principe de commande du tirage forcé

## IV.2 Amélioration de la régulation du combustible

Pour rendre le four plus rentable il faut minimiser sa demande d'énergie et vu que la SAMIR à toujours une quantité du fuel gaz qui n'est pas utile, nous avons proposé une méthode assez nouvelle pour utiliser cette source de fuel gaz jusqu'à la consommation totale de ce dernier, puis le compenser par le fuel oïl que l'on achète.

Pour la réalisation de cette solution on a :

Le schéma ci-dessous explique la réalisation de notre solution :

- On mesure la pression du fuel gaz et on la passe dans un bloc de calcul (FY) qui fait la différence entre cette mesure et la demande de combustible



- 
- ✓ deux transmetteurs de pression fuel gaz (**PT**).
  - ✓ Un transmetteur de débit fuel gaz (**FT**).
  - Partie Programmes :
    - ✓ Un régulateur de pression (**PIC**)
    - ✓ Un régulateur de débit (**FIC**)
    - ✓ Un bloc Passe Bas.
    - ✓ Un bloc soustracteur.

qui vient du bloc basse bas1, la sortie de ce bloc (FY) va servir comme consigne pour le régulateur de débit fuel oïl (FIC) qui va commandé la vanne de ce dernier afin de compenser le manque subit par le fuel gaz.

Or pour la vanne de contrôle débit fuel gaz qui est commandé soit par:

- un régulateur de débit (FIC) qui reçoit la mesure de débit fuel gaz a partir d'un transmetteur de débit (FT) et de la consigne a partir de bloc passe bas2, ce bloc à deux entrées la 1ere vient de régulateur de pression de fuel gaz et la 2ème vient de bloc passe bas1.
- ou par un régulateur de pression (PIC) qui nous a permis de garder le four a une certaine pression pour ne pas étouffer la flamme. ce régulateur à deux entrées, la 1ère est la mesure de pression qui vient du transmetteur de pression (PT) et la 2ème c'est la consigne de pression que le four doit garder.

## V. Installation après amélioration

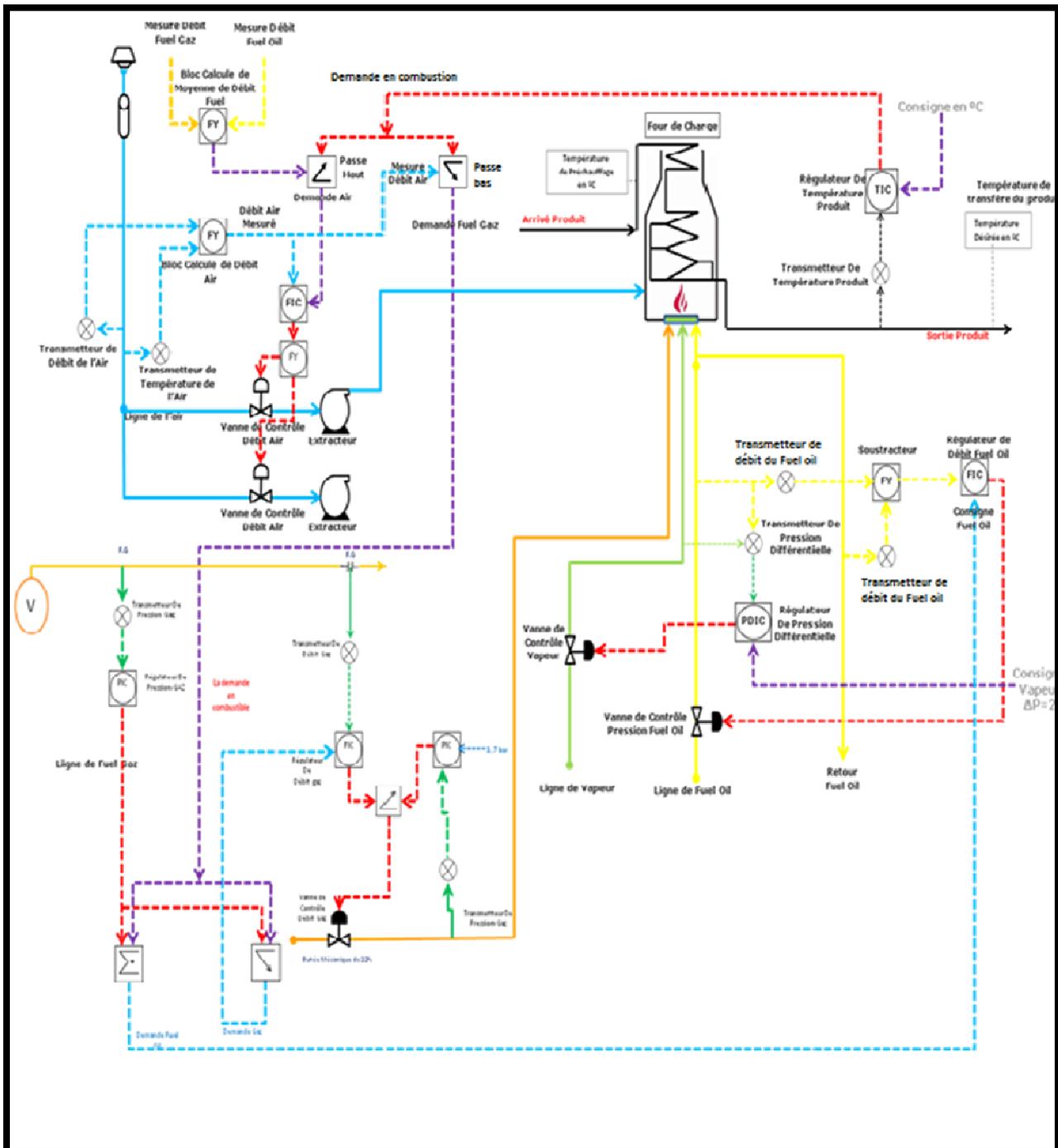


Figure 17: Schéma de la régulation avec les améliorations ajoutées



Cette partie regroupera les paramètres qu'on doit superviser tout en expliquant leurs utilités pour l'instrumentation et la supervision dans les fours. On discutera aussi l'installation d'instruments de mesure fondamentaux.

### III. Température

#### I.1. Température de la section de radiation

Les mesures de la température de la section radiantes peuvent être utilisées pour guider le contrôle de la combustion et pour éviter de surchauffer les tubes, la température limite de design dans la zone de radiation du four 011F1 est fixée à **395°C**. Les thermocouples dans la section radiante devraient être installés avec les puits ou les autres appareils protecteurs. Le point de mesure ne devrait pas être dans une branche d'acheminement de données du gaz froide, ni la flamme du brûleur devrait se heurter sur lui. Les matières du thermocouple doivent être résistantes aux températures de la zone. Le fer et l'acier inoxydable sont des matières généralement acceptables. Pour des contraintes plus sévères, des revêtements en céramique sont souvent utilisés.

#### I.2 Température de la section de convection

La mesure de la température du gaz du tuyau de cheminée dans la section de convection est utile pour contrôler l'efficacité, la température limite de design dans la zone de convection du four 011F1 est fixée à **400°C**. Le thermocouple doit être capable de supporter la température dans la section de convection, bien que les conditions dans cette section radiante. L'acier inoxydable est généralement une manière satisfaisante.

#### I.3 Température dans la cheminée

La température à la cheminée est utile pour évaluer la performance totale du four et pour garder la température de la cheminée dans les limites acceptables. Une température élevée peut indiquer une rupture du tube. En revanche, si la température est au-dessous du point de rosée, la corrosion sévère est possible dans la cheminée à cause de la présence de gaz acides. Alors cette



température doit être supérieure à **180°C** « point de rosé » et inférieur à **300°C**. Donc un thermocouple doit être installé près du point de l'échantillonnage pour l'analyse du gaz.

#### I.4 Températures du fluide chauffé

Les températures du fluide chauffé doivent être prises à un nombre suffisant d'emplacements pour évaluer la performance et assurer une exploitation fiable. Puisque le four 011F1 chauffe le brut, donc on doit installer plusieurs thermocouples pour avoir un profil de température.

On citera les emplacements où on doit installer les thermocouples.

- L'entrée du four.
- Chaque croisement de la section de convection à la section radiante.
- Chaque sortie du four.

Les thermocouples doivent être bien placés afin qu'ils soient exposés au flux et non dans un emplacement stagnant où ils peuvent être séparés par le coke.

La température de brut chauffé destiné à la colonne de distillation doit être fixée à **370°C**.

#### I.5 Température de la peau du tube

Les mesures de température de la peau des tubes, sont utilisées pour éviter la surchauffe des tubes suite à une réduction du débit à travers le tube ou lors de cokéfaction. Une mesure de la peau du tube devrait être faite dans deux ou trois tubes. Le point peut être sélectionné le mieux en considérant le profil de la température anticipé. Il est important que la température soit déterminée à ou près de la plus haute section du profil de la température elle est limitée à **271°C**.

#### I.6. Température du combustible

La mesure doit être faite à l'aide d'un thermocouple, ou ampoule de la résistance. Dans les plus mauvaises conditions, une basse température peut causer une flamme pauvre ou sale. D'autre part, une température trop haute peut causer la carbonisation de la pointe du brûleur.

- Dans le cas du Fuel Gaz : **T >120°**
- Dans le Cas du Fuel Oil : **T = 25°**



## I.7. Température d'air de combustion dans le récupérateur de chaleur

La mesure de la température à l'entrée de l'air et de la température des fumées à la sortie de la cheminée sont exigés pour évaluer la performance du préchauffeur, et comme un guide pour maintenir la température des fumées au-dessus du point de rosée pour prévenir la corrosion. Etude faite dans le chapitre de dimensionnement de chaleur.

## IV. Pression et débit

### II.1. La pression dans le four

Cette mesure est utilisée comme un guide à l'exploitation du four. Les mesures de la pression devraient être faites en amont et en aval des ventilateurs, à travers le réchauffeur d'air, dans le canal d'air venant du préchauffeur vers les brûleurs, au bas et au sommet de la section radiante. La mesure de la dépression pour l'arrêt d'urgence du four est localisée typiquement au sommet du tuyau de la cheminée le four en général doit être en dépression.

### II.2. Débit du combustible

Le gaz du combustible et le flux du fuel peuvent être mesurés avec les appareils tels que des orifices calibrés ou des compteurs à turbine. Un débitmètre devrait être installé dans la ligne du combustible principale, où la pression est constante. Pour les combustibles gazeux, là où la densité ou la pression varie, la correction du flux pour ces variables est désirable. ce débit vari selon la charge du Four.

### II.3. Pression du combustible

#### II.3.1. Cas du combustible gazeux

La pression du combustible doit être entre **0.5** et **2** bars pour éviter l'extinction des brûleurs. Donc une alarme est recommandée en cas de baisse de pression.

#### II.3.2 Cas du fuel oil

Pour le cas du fuel, une vanne de régulation est reliée à l'indicateur de température de la charge à la sortie pour chaque four, la vanne s'ouvre si la température chute et vis versât.



Puisque la vapeur d'atomisation est utilisée pour pulvériser le fuel oil, il est nécessaire de contrôler la pression différentielle entre le combustible et la vapeur, de telles sortes que la différence de pression entre la vapeur et FO est de **1 à 2 bars**.

#### II.4. Débit d'air de combustion

Le flux de l'air dans les fours à tirage forcé est une mesure importante pour contrôler l'excès. La méthode d'obtention de cette mesure est d'installer un venturi sur la colonne d'admission d'air en amont du ventilateur.

- Le débit maximal : 35 000 kg/h ;
- Le débit minimal : 7200 kg/h ;
- Le débit d'alarme : 14 000 Kg/h ;

#### II.5. Mesure de la pression différentielle à travers le réchauffeur d'air

Cette mesure est importante pour connaître l'état d'encrassement de l'échangeur côté fumée. Ainsi, on pourra planifier la maintenance et la fréquence de nettoyage de l'échangeur. Généralement pour le Four 011F1 elle ne doit pas dépasser **80 mmH<sub>2</sub>O**.

### III. Analyses

#### III.1. Analyse des fumées de la cheminée

Les analyseurs de gaz sont souvent utilisés comme un moyen de contrôle de l'efficacité de la combustion et des émissions atmosphériques. Les méthodes indirectes peuvent être aussi une technique acceptable pour satisfaire ces exigences. Les points de mesure devraient être localisés à la sortie de chaque chambre de combustion, et dans la sortie de la section de la convection afin que la composition de gaz du tuyau de cheminée puisse être déterminée par analyse.



### III.2. Teneur en oxygène

Pour maintenir l'efficacité et la sécurité du processus de combustion, l'oxygène en excès est une mesure importante. Un superviseur de la combustion ajuste continuellement l'alimentation du combustible pour satisfaire les exigences de la charge variables et maintenir une proportion

correcte d'air / combustible. Pour obtenir une bonne mesure concernant la qualité de combustion, les échantillons devraient être apportés aussi proche que possible au point où la combustion est complétée, normalement à la sortie de la section radiante. Pour obtenir le pourcentage d'oxygène dans la cheminée, un analyseur d'oxygène est utilisé. L'analyseur peut aussi être utilisé pour l'alerte en cas d'excès d'air important ou d'un défaut d'air.

Le pourcentage d'oxygène limite pour le four 011F1 est **6%**.

**Remarque :** les valeurs des débits, températures et pressions sont prises depuis la salle de contrôle de Topping 2 et les data sheet du four 011F1.



## Chapitre IX : Evaluation économique



L'initiation d'un projet impose l'implication de moyens importants tant en matériel qu'humain et d'être entouré d'un maximum de précaution lors du processus de développement du projet. Il faut pouvoir porter des arguments de valeur sur le projet tant sur le plan qualitatif (faisabilité technique) que sur le plan quantitatif en essayant par l'évaluation économique de chiffrer la rentabilité du procédé.

## **I. Coût d'investissement** <sup>[13]</sup>

L'investissement comprend l'ensemble des coûts relatifs à la conception de l'installation, aux équipements et à leurs installations, et représente la somme des dépenses facturées par les fournisseurs de ces services.

### **f) Echangeur de chaleur**

Le coût de l'échangeur de chaleur dépend de la surface d'échange, du type d'échangeur ainsi que du matériau utilisé pour la construction... etc.

L'évaluation économique de l'échangeur est basée sur les données proposées par la société RIZZI ENGINEERING; C'est le fournisseur principal des équipements thermiques dans la SAMIR.

$$\underline{I(\text{Echangeur}) = 1\ 252\ 788,317\text{DH}}$$

### **g) Extracteur et deux ventilateurs**

Le coût de l'extracteur et des deux ventilateurs est estimé auprès des fournisseurs industriels.

Donc le coût de l'extracteur qu'on va installer est de :

$$I(\text{extracteur et deux Ventilateurs}) = 1\ 531\ 990,9\text{DH}$$

### **h) Les brûleurs**



D'après les appels d'offre lancé par la SAMIR, les brûleurs qu'on va installer sont de type : mixte, qui fonctionnent en tirage forcé de l'air .Le four 011F1 est doté de 9 brûleurs cela fait un total de :

$$I(\text{brûleurs}) = 856\,025 \text{ DH}$$

### **i) Instrumentation**

Le nouveau système qu'on va mettre en place demande des moyens de contrôle automatique pour superviser la pression et la température dans les zones critiques du circuit et donc assurer un fonctionnement bien conditionné.

Le coût de l'instrumentation selon l'expérience des services techniques et l'expérience des responsables à la SAMIR est de l'ordre de :

$$I(\text{Instrumentation}) = 4\,400\,000 \text{ DH}$$

### **j) Isolation thermique**

- Calorifugeage des conduites d'air :

La laine de verre offerte avec un coût de 9 DH/m<sup>2</sup> pour une épaisseur de 10 mm. Elle est l'un des isolants les moins chers sur le marché.

La surface des conduites d'air est de 44 m<sup>2</sup>, donc le calorifugeage est de 400 DH.

- Calorifugeage des conduites des fumées

Le béton réfractaire offert avec un coût de 16 DH/m<sup>2</sup> pour une épaisseur de 18 mm.

La surface des conduites d'air est de 80 m<sup>2</sup>, donc le calorifugeage est de 1280 DH.

- Calorifugeage de l'échangeur

Le calorifugeage de l'échangeur représente 0,5 % du coût de l'échangeur, c'est-à-dire 4600 DH.

$$I(\text{Isolation thermique}) = 6300 \text{ DH}$$

Le tableau 8 résume les investissements du projet cité ci-dessus, en plus des autres investissements relatifs aux travaux mécanique, génie civil, et la formation du personnel. Ces



investissements sont estimés grâce à l'expérience des ingénieurs projets à la SAMIR qui travaillent souvent sur des projets similaires.

Equipement et Services	Prix en DH
Echangeur	1 252 788,317
2 Ventilateurs d'air et extracteur	1 531 990,9
Brûleurs	856 025,5
Guillotines et registres	805 299
Instrumentation	4 400 000
Travaux génie civil	638 000
Travaux mécaniques	4 730 000
Travaux électriques	330 000
Armoire électrique	330 000
Câbles électriques	440 000
Joints d'expansion	57 200
Formation du personnel	90 000
Isolation thermique	6300
<b>Frais Annexes</b>	
Transport du gros matériel	22 700
Douane	90 000
Assurances	15 000
Frais de démarrage	38 000
Imprévus	90 000
<b>Autres</b>	
Frais de roulement	60 500
Frais d'entretien	220 000
<b>TOTAL</b>	<b>16 003 803,72</b>

Tableau 17: Résultats de calcul du coût d'investissement

Le coût d'investissement global est I = 16,003 MDH.



## II. Gain annuel

L'installation du système de récupération de chaleur qu'on a dimensionnée pour le four 011F1 permet l'augmentation du rendement du four en diminuant la consommation du fioul, et donc générer un gain annuel très important qui correspond au nouveau rendement.

Tout d'abord on établit le nouveau bilan de matière avec le système de récupération de chaleur.

Les chaleurs absorbées par le four avant et après l'installation du système du préchauffage sont données dans le tableau suivant :

	Rendement $\eta$ (%)	Chaleur absorbée (Kcal/h)
<b>Tirage naturel</b>	73,17	$15,43.10^6$
<b>Tirage forcé</b>	88,6	$12,72.10^6$

**Tableau 18: Amélioration du rendement après l'installation du récupérateur**

L'ancien rendement du four 011F1 est :

$$\eta = 73,17\%$$

Le nouveau rendement avec la nouvelle installation est :

$$\eta = 88,6\%$$

L'installation du système de récupération de chaleur permet l'augmentation du rendement par une différence de  $\cong 15\%$ .

$$D_{\text{Fioul011F1}} = \frac{Q_{\text{Abs}}}{\text{PCI} * \eta_{011F1}}$$

Le débit de fioul consommé dans le cas de tirage naturel est de :

$$D_{\text{Fioul011F1}}(\text{tirage naturel}) = 2201,77 \text{ kg/h}$$

Le débit de fioul consommé dans le cas de tirage forcé est de :

$$D_{\text{Fioul011F1}}(\text{tirage forcé}) = 1505,68 \text{ kg/h}$$

Le gain qu'on peut réaliser avec la nouvelle installation correspond à la différence du débit du combustible qu'on peut économiser dans le four 011F1.

$$\Delta D_{\text{Fioul011F1}} = 696 \text{ kg/h}$$



Les économies réalisées pour une exploitation continue avec 24 jours d'arrêt annuelle sont calculés suivant la relation suivante :

$$E_{co} = \Delta D_{\text{Fioul}} * 24 * (365 \text{ jours} - 24 \text{ jours})$$

$$E_{co} = 5\,696\,064 \text{ kg/an}$$

Pendant une année on peut économiser **5 696 064** kg du Fioul oil, et sachant que le fioul oil coute pour la SAMIR 5000 DH/Tonne, on peut réaliser un gain annuel de :

$$B = 28\,480\,320 \text{ DH/an}$$

### III. Amortissement et rentabilité du projet

Quel que soit la nature d'un projet, sa motivation et son degré d'élaboration, la préoccupation majeure d'un industriel à son égard consiste à savoir s'il sera rentable de le concrétiser, en d'autres termes, s'il génèrera des bénéfices.

L'évaluation budgétaire permettra à la direction générale de SAMIR de connaître le coût de l'installation. De ce fait elle revêt un caractère important dans la mesure où c'est sur la base de cette évaluation budgétaire que le temps de remboursement sera calculé. Ce dernier étant en définitive le critère déterminant à partir duquel la direction générale donnera son accord et débloquera les fonds nécessaires à la réalisation du projet.

#### c) Amortissement du projet

Il existe une multitude de démarches qui s'appliquent au calcul de l'amortissement annuel d'un projet, parmi lesquelles nous citons :

- L'amortissement linéaire (Straight-line method) ;
- L'amortissement dégressif (Declinign balance method) ;
- L'amortissement économique constant (sinking fund method).

Concernant notre étude, c'est la méthode d'amortissement linéaire qui a été adoptée pour question de simplicité.



L'amortissement annuel  $A$ , donné par la méthode de l'amortissement linéaire est suivante :

$$A = \frac{I - I_r}{n}$$

Avec :

$I$  : Investissement global de l'installation ;

$I_r$  : Valeur résiduelle de l'équipement à la fin de la durée de vie, nous prenons  $I_r = 0$  ;

$n$  : Durée de vie de l'équipement.

On obtient donc:

$$A = \frac{I}{n}$$

Remarque :

La durée de vie d'un échangeur de chaleur est estimée à  $n = 11$  ans.

On peut en conclure que l'amortissement annuel sera évalué à :

$$A = 1\,454\,892\text{DH}$$

#### d) Evaluation de la rentabilité du projet

Il existe de nombreuses méthodes permettant d'apprécier le retour sur investissement d'un projet parmi lesquelles on cite :

- **La méthode du « POT »** ou du temps de remboursement simplifié ; qui est défini comme étant la durée au bout de laquelle les recettes totales liées au fonctionnement d'une unité ou d'un complexe, déductions faites de toutes les sorties y compris les taxes, sont égales au montant global des investissements nécessaires à l'achat, la construction, le démarrage..., des installations, c'est-à-dire au montant du capital amortissable initial.
- Les méthodes reposant sur le bénéfice actualisé ou Cash flow actualisé ; qui se basent sur le calcul du revenu annuel, l'actualiser et examiner ses variations en fonction du temps par la suite.



- **Le taux de rentabilité interne** « rate of return » ou « Internal Economic Return » ; ce taux est égal à la valeur du taux d'actualisation  $i$  qui annule le bénéfice actualisé sur  $n$  années.
- **Taux de rotation du capital** ; ce taux représente le rapport du chiffre d'affaires annuel au capital investi. Il permet de classer des projets de natures différentes, impliquant des schémas de procédés très éloignés dans leur conception et par suite des mises de fonds initiales nettement distinctes. C'est une mesure du renouvellement des sommes immobilisées.
- **Méthode du point mort**....etc.

La méthode du « **POT** » est la plus fréquemment utilisée, et est considérée comme étant un critère de rentabilité déterminant, c'est pour cette raison que nous l'adoptons pour évaluer le gain du projet.

Le POT représente le temps au bout duquel l'entreprise, qui a consenti l'investissement  $I$ , récupérera son capital immobilisé sous forme de bénéfices réels (taxes déduites) et sous forme d'une provision pour amortissement.

Il est donné, en années, par l'expression suivante:

$$POT = \frac{I}{B * (1 - a) + A}$$

Avec :

$B$  : Bénéfices bruts annuels (avant déduction des impôts) ;

$a$  : Taux d'impôt sur les bénéfices bruts ;

$A$  : Annuité d'amortissement.

<b>Bénéfices bruts annuels DH/an</b>	28 480 320
<b>Taux d'impôt sur les bénéfices bruts</b>	30 %
<b>Annuité d'amortissement DH/an</b>	1 454 892
<b>Investissement global DH</b>	16 003 803,72



Le calcul du POT donne 8 mois pour rembourser l'investissement.

$$\text{POT} \cong 8\text{mois}$$

## Conclusion

Il s'avère que c'est très important pour la SAMIR de réaliser ce projet, sachant qu'on puisse faire une économie énergétique, donc un gain annuel estimé à 28,48MDHS/an avec un temps de retour sur investissement de 8 mois.



## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le présent travail est l'un des projets entretenus par la SAMIR visant les économies d'énergie et la rénovation des équipements de la raffinerie. Il est porté sur le dimensionnement d'un système de récupération de chaleur du four 011F1.

Ainsi, on a développé une méthodologie de travail qui peut être généralisée aux autres fours de la raffinerie et pourra être une source d'inspiration pour la récupération d'énergie dans les autres types de four.

Dans la présente étude, nous avons pu traiter et analyser plusieurs volets. Nous avons commencé par une étude bibliographique sur les fours suivie de l'établissement d'un bilan thermique et le calcul de rendement du four 011F1. Dans la partie conception, le dimensionnement de l'échangeur de chaleur qui nous a permis de déterminer la surface d'échange nécessaire, un dimensionnement pour les autres équipements (Ventilateur d'air, Extracteur de fumées, Brûleurs) et nous avons complété cette étude par une partie de calorifugeage.

Par la suite, nous avons regroupé les paramètres assurant la bonne marche du système de récupération de la chaleur. Ainsi nous avons étudié la boucle de régulation avec tirage forcé ce qui a augmenté le rendement du four de 15%.

En fin, une évaluation économique de l'installation proposée nous a permis de chiffrer et examiner la rentabilité du procédé, en contactant les fournisseurs, et en profitant de l'expérience des ingénieurs projet de la raffinerie ce qui nous a permis de réduire la consommation spécifique du fuel en récupérant l'énergie des fumées au niveau des fours et d'avoir un temps de retour sur l'investissement de 8 mois.

La présente étude n'est pas une fin en soi, il est souhaitable de la compléter par :

- Une étude plus approfondie sur le calorifugeage des parois et des canalisations.
- Une autre étude plus détaillée de régulation et d'opérabilité du système.
- Simultanéité de la conception et du contrôle.
- Etude de l'installation du système de récupération dans les autres fours de la raffinerie.

## ANNEXE III



**La masse volumique et la viscosité cinématique de l'air sous la pression atmosphérique normale de 101325 Pa (calcul selon ISO 5801 [12])**

**ANNEXE IV**

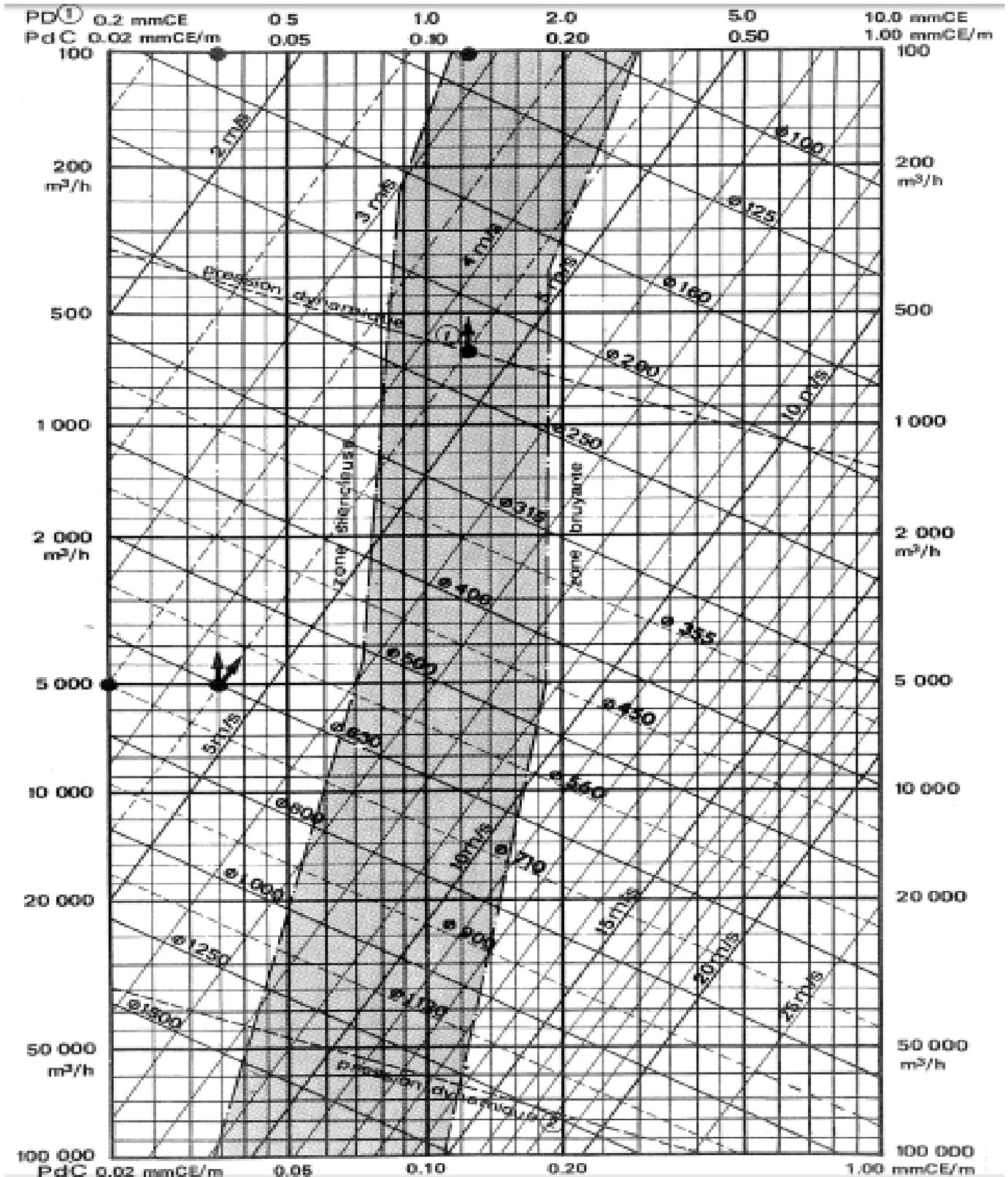
Température °C	Air sec		Air humide (humidité relative 50%)	
	Masse volumique Kg/m <sup>3</sup>	Viscosité cinématique 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s	Masse volumique Kg/m <sup>3</sup>	Viscosité cinématique 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s
-20	1.395	1.157	1.394	1.158
-10	1.342	1.239	1.341	1.239
0	1.293	1.323	1.291	1.325
10	1.247	1.410	1.244	1.413
<b>20</b>	<b>1.204</b>	<b>1.500</b>	<b>1.199</b>	<b>1.506</b>
30	1.165	1.592	1.155	1.605
40	1.127	1.687	1.112	1.711
50	1.093	1.785	1.067	1.827
60	1.060	1.885	1.020	1.958
70	1.029	1.989	0.969	2.111
80	1.000	2.095	0.911	1.297
90	0.972	2.203	0.845	2.535
100	0.946	2.315	0.767	2.854

**La vitesse maximale de l'air en fonction du débit**



Débit de transit dans les canalisations [Kg/h]	Vitesse maximale [m/s]
Débit < 300	2,5 [m/s]
Débit < 1000	3 [m/s]
Débit < 2000	4 [m/s]
Débit < 4000	5 [m/s]
Débit < 10 000	6 [m/s]
<b>Débit &gt; 10 000</b>	<b>7 [m/s]</b>

**ANNEXE V**  
**Abaque de pertes de charges linéaires**



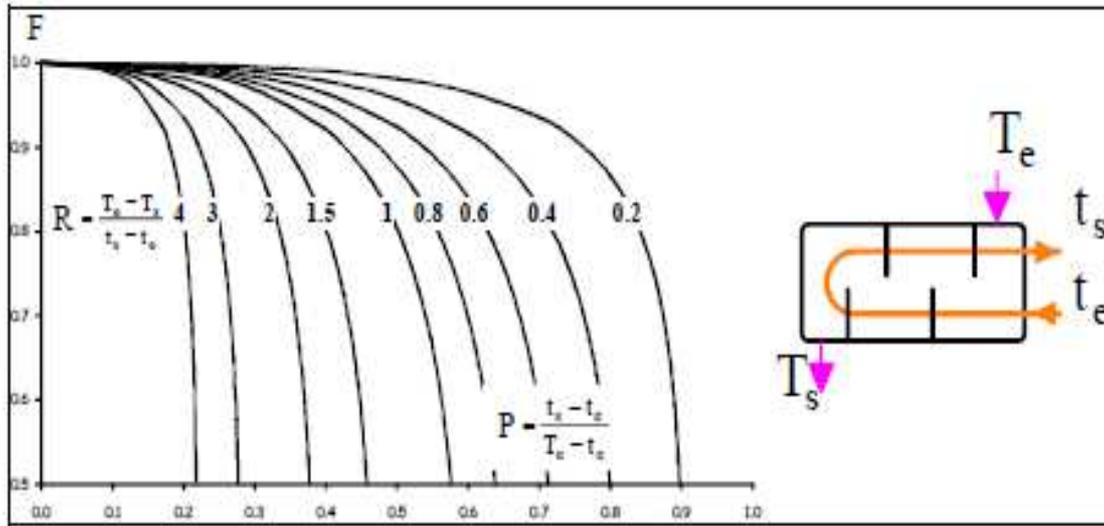


**ANNEXE I**  
**Composition chimique des fumées**

Eléments chimiques	Composition%	Chaleur spécifique (J/Kg.K)
N <sub>2</sub>	83.33	1058.67
O <sub>2</sub>	4	964.884
CO <sub>2</sub>	12.4	1017.56
NO	6.36 *10 <sup>-3</sup>	1018.89
SO <sub>2</sub>	0.26	766.5

$$C_{p \text{ fumées}} = \sum_{i=0}^5 X_i \cdot C_{pi}$$
$$C_{p \text{ fumées}} = 1049,048 \text{ J/Kg.K}$$

**ANNEXE II**  
**L'abaque pour la détermination du facteur de correction F**





## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Généralités sur les fours de raffinage « enspm, Formation Samir ».
- [2] : J.LE NOGUES, « Etudes des fours pétrolier et chimique », Edition technip-1974.
- [3] : Werner HEILIGNSTAEDT, « Thermique appliquée aux fours industriels » Tome2, DUNOD Paris 1997.
- [4] : American Petroleum Institute «Fired heaters for general refinery service », API560.
- [5] : La division énergétique de SAMIR en collaboration avec l'équipe « Shell global solution ».
- [6] : Formation à la SAMIR, « Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs ».
- [7] : Techniques de l'ingénieur, « Transferts thermiques ».
- [8] : Techniques d'ingénieur, « Echangeur de chaleur-Dimensionnement thermique ».
- [9] : Techniques de l'ingénieur, « Echangeurs de chaleur : Problèmes de fonctionnement ».
- [10] : Stanley. M.WALLAS, « Chemical Process Equipment Selection and Design » (1991).
- [11] : M.Meury, « Memento des pertes de charge ».
- [12] : J.LIGEN et M. LE GUAY, « le boussicaud » 'Pertes de charge'.
- [13] : CHAUVEL : "Manuel d'évaluation économique des procédés"(1976).