



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE 20 AOÛT 1955 –SKIKDA

Faculté de Technologie

Département de Pétrochimie

## **Mémoire**

En vue d'obtention du diplôme de

## **Master**

**Filière :** Industrie Pétrochimique

**Spécialité :** polymère en industries pétrochimiques

# **Calcul de l'épaisseur des tubes des fours liés à la distillation atmosphérique de U-100 de la Raffinerie de Skikda RA2K**

**Réalisé par :**

**Bengati Haroun**

**Encadré par :**

**Dr. MARSA Zoubida**

**Promotion 2023 / 2024**

## REMERCIEMENTS

*La* réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui on voudrait témoigner toute nos gratitudee.

*Tout* d'abord, nous remercions Dieu, le tout puissant, pour la force et la volonté qu'il nous a donné pour mener à bien ce modeste travail.

*Nous* tenons à remercier sincèrement notre encadreur Dr. Zoubida MARSA pour nous avoir confié ce thème, pour les connaissances qu'elle a sues nous transmettre, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils.

*Nous* remercions vivement les membres du jury, Dr. Nassima RAMDANE, Madame Amel CHELGHAM et Dr Chahrazed SAADI.

*Nous* remercions également l'ensemble des enseignants du département de pétrochimie de l'université 20 AOUT 1955- Skikda.

## **DEDICACES**

A mes chers parents,

Qui m'ont transmis courage et ténacité, qui m'ont toujours porté pour mener à bien mes études,  
qui ont su m'épauler et me guider tout au long de ces années,

A mes très chers frères, toute ma famille et amies merci d'être toujours présent pour moi.

A tous ceux et celles qui m'ont encouragé, entourés de leur soutien durant les moments difficiles  
avec tant d'amour et de compréhension

## **Résumé**

Ce mémoire vise à proposer des solutions concrètes et expérimentales afin de résoudre le problème de l'usure ou de réduire la perte de matière causée par ce phénomène.

L'objectif de cette tâche est d'évaluer la résistance des tubes des fours de la raffinerie RA2K, en raison de leur diminution d'épaisseur due à l'usure des tubes causée par le frottement avec les supports intermédiaires. Dans le but de diminuer les pertes en matière et d'éviter les dommages, en cas de rupture ou de défaillance de l'un de ces tubes, cette étude a été réalisée afin de prédire, de manière estimée, le délai d'intervention. Il est essentiel de comprendre les origines du problème, y compris la détermination du type d'usure. Les fours sont des dispositifs de production de chaleur, et les températures de service sont très élevées. Par conséquent, il est essentiel de calculer les contraintes thermiques maximales et limites.

**Mots-clés :** Raffinerie RA2K, contrainte, usure, épaisseur, tribologie, solutions pratique

## **Abstact**

The aim of this dissertation is to provide practical and experimental solutions to the problem of wear, or to reduce material loss due to this phenomenon.

This work consisted in determining the strength of the tubes used in the furnaces of the RA2K refinery, as a result of the thinning in thickness caused by the friction of these tubes with the intermediate supports. In order to reduce material losses and prevent damage in the event of rupture or failure of one of these tubes, this work was carried out to predict the estimated intervention time. Knowledge of the causes of the problem is essential, and determining the type of wear is one of them. Furnaces are heat-generating equipment, and operating temperatures are extremely high, so calculating maximum and limit thermal stresses is essential.

Keywords: RA2K refinery, stress, wear, thickness, tribology, practical solutions

## ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو تقديم حلول عملية ونجربية لمشكلة التآكل، أو الحد من فقدان المواد الناجم عن هذه الظاهرة.

يتألف هذا العمل من تحديد مقاومة الأنابيب في الفرن في مصنعة RA2K، بعد ترقق سمكها بسبب التآكل الناجم عن احتكاك هذه الأنابيب بالدعامات الوسيطة. ومن أجل تقليل الخسائر المادية ومنع حدوث أضرار في حالة حدوث كسر أو تعطل أحد هذه الأنابيب، تم تنفيذ هذا العمل للتنبؤ بالوقت المتبقي للتدخل. إن معرفة أسباب المشكلة أمر ضروري، وتحديد نوع التآكل هو أحد هذه الأسباب. الفرن عبارة عن معدات مولدة للحرارة، ودرجات حرارة التشغيل مرتفعة للغاية، لذلك من الضروري حساب حد الاجهاد و الاجهاد الأقصى من الضغوط الحرارية.

الكلمات المفتاحية: مصنعة RA2K، الاجهاد، التآكل، السمك، علم الاحتكاك، الحلول العملية

# Sommaire

REMERCIEMENTS.....	
DEDICACES.....	
Résume .....	
Liste des abréviations .....	
List des tableaux .....	
List des figures.....	
List des annexes .....	
Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Présentation du complexe topping</b>	
I.1 Introduction .....	4
I.2. Présentation du Topping de Condensat de Skikda .....	5
I.3 Historique de la raffinerie .....	5
I.4 Organisation du complexe .....	6
I.5 Différentes unités du complexe .....	8
I. 5.1 L'unité Topping de condensât .....	8
I.5.1.1 Train d'échangeurs de préchauffage.....	9
I.5.1.2 Section de la colonne de distillation .....	11
I.5.1.3 Section de la colonne de distillation atmosphérique.....	11
I.5.1.4 Section de stabilisation de naphta.....	11
I.5.1.5 Section du dépropaniseur.....	12
I.5.1.6 Section du sécheur de butane.....	12
I.5.1.7 Section de la tour sous vide .....	12
I.5.2 L'unité de traitement de kérosène.....	12
I.5.3 Le stockage et le transfert des produits .....	13
I.5.4 L'unité de torche.....	13
I.5.5 L'unité d'utilités .....	13
I.5.5.1 Unité 501-Traitement des eaux usée.....	13
I.5.5.2 U502- Tour de refroidissement.....	13
I.5.5.3 U503- Réseaux d'alimentation et drainage d'eau.....	13
I.5.5.4 Unité 504 réseau anti-incendie .....	14
I.5.5.5 U505- Air comprimé, vapeur et azote .....	14
I.6 Vue générale sur les fours de la raffinerie RA2K.....	14

I.7	Conclusion.....	16
<b>Chapitre II : Description de l'unité de distillation atmosphérique</b>		
II.1	Définition .....	18
II.2	Généralité sur les distillations industrielles.....	18
II.2.1	Principe de La distillation atmosphérique.....	18
II.2.2	la Distillation sous vide .....	19
II.3	Les équipements de distillation atmosphérique.....	19
II.3.1	les colonnes.....	19
II.3.1.1	définition .....	19
II.3.1.2	Les différentes types des plateaux .....	20
II.3.2	les rebouilleurs.....	21
II.3.2.1	généralités sur le rebouilleur .....	21
II.3.2.2	Les types des rebouilleurs .....	22
II.3.3	les condenseurs .....	23
II.3.3.1	Classification et utilisation des condenseurs .....	23
II.3.3.2	Les types de condenseurs .....	24
II.3.3.3	Fonctionnement général d'un condenseur.....	25
II.3.4	Les fours .....	26
II.3.4.1	Usage et domaines d'utilisation .....	26
I.3.4.2	Différents types des fours tubulaires .....	27
I.3.4.3	Description et construction des fours .....	30
I.3.4.4	L'enveloppe métallique (casing) .....	31
I.3.4.5	Matériaux réfractaires et isolants .....	31
I.3.4.6	Tubes et accessoires du faisceau tubulaire.....	32
I.3.4.7	Les brûleurs .....	33
I.3.4.8	Surveillance des brûleurs .....	35
I.3.4.9	Cheminée .....	35
I.3.4.10	Les préchauffeurs d'air .....	35
I.3.4.11	La combustion dans un four.....	37
I.3.4.12	Le rendement d'un four .....	38
I.3.4.13	Les fours de la raffinerie RA2K .....	39
<b>Chapitre III : Généralités sur l'usure</b>		
III .1	introduction .....	44
III.2	Les frottements .....	44

III.2.1	Les différents types de frottement .....	44
III.3	Etats de surface .....	45
III.4	Défauts de rugosité .....	46
III.5	Facteurs de l'usure.....	47
III.5.1	Mode de contact.....	47
III.5.2	Vitesse relative entre les pièces .....	47
III.5.3	Ambiance .....	47
III.5.4	Nature des matériaux.....	47
III.6	Les effets observables de l'usure.....	48
III.6.1	La résistance au déplacement .....	48
III.6.2	Phénomènes thermiques .....	48
III.6.3	Transformations géométriques .....	48
III.6.4	Transformations mécaniques et chimiques .....	48
III.6.5	Variation de masse .....	48
III.7	Les principaux modes d'usure .....	49
III.7.1	Usure adhésive .....	49
III.7.1.1	Prévention de l'usure adhésive .....	49
III.7.2	Usure abrasive .....	50
III.7.2.1	Prévention de l'usure abrasive.....	50
III.7.3	L'usure corrosive.....	51
III.7.3.1	Protection et lutte contre la corrosion des métaux .....	51
III.8	L'usure dans les tubes des fours de la raffinerie RA2K.....	51

#### **Chapitre IV : Calculs et recommandations**

IV.1	Introduction.....	54
IV.2	Les dégâts que l'usure des tubes peut engendrée .....	54
IV.3	Historique de l'usure des tubes.....	54
IV.4	Design des tubes dans un four .....	57
IV.5	Conception élastique (Elastic design) .....	58
IV.6	Conception à la limite de rupture (Rupture design) .....	58
IV.7	Calcul de l'épaisseur du design .....	58
IV.7.1	Épaisseur minimum du design $\delta_{\min}$ .....	58
IV.7.2	Vérification de l'épaisseur du design .....	60
IV.8	Calcul de résistance sous contrainte thermique .....	61
IV.8.1	Calcul de la contrainte initiale.....	61
IV.8.2	Calcul de la contrainte thermique maximale .....	61

IV. 8.3	Calcul de la contrainte thermique limite.....	62
IV.9	Calcul de résistance des tubes après l'usure .....	63
IV.9.1	Calcul de la contrainte après l'usure des tubes.....	63
IV.9.2	Calcul de la contrainte thermique limite .....	63
IV.10	Prévention de la rupture des tubes .....	64
IV.10.1	Calcul de la durée de vie restante (remaining life time).....	64
IV.10.2	Calcul estimatif du temps après l'échec .....	65
IV.11	Solution pratique pour la réparation des tubes.....	65
IV.11.1	Manchons de renforcement en acier à encerclement complet du tube .....	65
IV.11.2	Plaque insérée et soudée bout-à-bout.....	67
IV.12	Calcul de résistance des tubes après ajoutant un Manchons de renforcement.....	69
IV.12.1	Calcul de la contrainte après ajoutant un Manchons de renforcement.....	69
IV.12.2	Calcul de la contrainte thermique limite .....	69
IV.13	Calcul de la durée de vie restante après ajoutant un Manchons de renforcement.....	69
	Conclusion générale.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
	Références Bibliographiques .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
	Annexes .....	76

## Liste des abréviations

RA2K : Raffinerie du topping de condensat de Skikda ;

LGO : Gasoil léger ;

HGO : Gasoil lourd ;

Jet A1: Carburant pour aviation (Kérosène) ;

GPL : Gaz du pétrole liquéfier ;

$\delta_{\min}$  : Épaisseur minimum;

$f_{\text{corr}}$  : Facteur de corrosion ;

$\delta_{C\&E}$  : Surépaisseur de corrosion ;

$\delta_{\sigma}$  : Épaisseur calculée suivant la contrainte appliquée ;

$D_0$  : Diamètre extérieur du tube neuf ;

$D_i$  : Diamètre intérieur du tube ;

$P$  : Pression du design ;

$\sigma_{el}$  : La limite élastique du matériau ;

$\sigma_0$  : Contrainte initiale ;

$\delta$  : Épaisseur minimum installé ;

$\sigma_{T\text{max}}$  : Contrainte thermique maximale ;

$\alpha$  : Coefficient de dilatation thermique ;

$E$  : Module d'élasticité (module de Young) ;

$\nu$  : Module de poisson

$\Delta T$  : Différence de température de peau du tube ;

$y$  : Ratio du diamètre extérieur au diamètre intérieur;

$q_0$  : Flux de chaleur sur la surface du tube ;

$\lambda_s$  : Conductivité thermique du métal ;

$\sigma_{T,\text{lim1}}, \sigma_{T,\text{lim2}}$  : Contraintes thermiques limites ;

$\sigma$  : Contrainte actuelle de la pression interne ;

$\delta_a$  : Épaisseur actuel, en mm ;

$t_r$  : Temps restant estimé avant ;

$r$  : Taux d'usure ;

$t$  : Période de service ;

$\delta_i$  : Épaisseur initial.

List des tableaux

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Tableau 1	Modes d'exploitation de l'unité 100.	09
Tableau 2	Estimation de la durée de vie après l'usure	69
Tableau 3	Estimation de la durée de vie après ajoutant le monchon	74

## List des figures

Figure I.1	Localisation géographique de la raffinerie RA2k	6
Figure I.2	Organisation Du Complexe	7
Figure I.3	Schéma process d'unité 100 de topping	10
Figure I.4	Implantation des fours du topping de condensât	15
Figure II.1	Plateaux perforés	20
Figure II.2	Plateaux à calottes	21
Figure II.3	Rebouilleur vertical	22
Figure II.4	Condenseur à air	24
Figure II.5	Condenseur tubulaire	25
Figure II.6	Schéma d'un four à convection	28
Figure II.7	Four classique	29
Figure II.8	Four cabine	29
Figure II.9	Coupe d'un four cylindrique vertical	30
Figure II.10	Types de tubes de la zone de convection	31
Figure II.11	Disposition du garnissage réfractaire par rapport au casing	32
Figure II.12	Supports des tubes de la zone de radiation	33
Figure II.13	Préchauffeur d'air intégré	36
Figure II.14	Préchauffeur d'air séparé	37

Figure II.15	Vue du circuit process des fours de la raffinerie RA2K	40
Figure II.16	Disposition des tubes dans la zone de radiation	41
Figure II.17	Partie supérieure de la zone de convection avec des tubes ailetés	42
Figure II.18	Partie inférieure de la zone de convection avec des tubes lisses	42
Figure III.1	Frottement sec	45
Figure III.2	Défauts relatifs à l'état de surface	46
Figure III.3	Différents ordres de grandeur des défauts de rugosité	47
Figure III.4	Types de jonction entre deux aspérités	49
Figure III.5	Production de l'usure abrasive	50
Figure IV.1	Usure des tubes par friction, Four 100-F-101	55
Figure IV.2	Usure des tubes par friction en 2013, Four 100-F-102	55
Figure IV.3	Usure des tubes par friction en 2016, Four 100-F-101	56
Figure IV.4	Usure des tubes par friction en 2016, Four 100-F-102	56
Figure IV.5	Usure des tubes par friction en 2016, Four 100-F-103	57
Figure IV.6	Facteur de corrosion	58
Figure IV.7	Manchon de renforcement du Type A	65
Figure IV.8	Manchon de renforcement du Type B	66
Figure IV.9	Type d'insertion d'une plaque soudée dans un tube	67

# **Introduction générale**

## Introduction générale

La température est perçue comme l'un des principaux paramètres opératoires dans les procédés pétroliers. Effectivement, qu'il s'agisse de vaporiser une coupe d'hydrocarbures lors d'une distillation ou de faire réagir certaines molécules à transformer, de nombreux équipements permettent d'ajuster cette variable opératoire. Ce paramètre est assuré par deux types d'équipements :

- Les échangeurs de chaleur, qui permettent de récupérer l'énergie thermique contenue dans les différents flux de fluides ;
- Les fours, qui génèrent la plupart de l'énergie nécessaire aux différentes opérations.

Les fours jouent un rôle crucial dans les secteurs du raffinage, du gaz et de la pétrochimie. Grâce à leur conception, ils doivent satisfaire aux nombreuses exigences émises par les utilisateurs, qui incluent principalement une charge thermique spécifique, un rendement thermique maximal techniquement réalisable, un bon facteur de marche et une flexibilité d'opération satisfaisante. C'est pourquoi les problèmes liés à la conception, à la construction, à la conduite et à l'entretien des fours sont importants.

La conception mécanique des fours est confrontée à de multiples défis, dont l'usure est une composante importante. La base de toutes les connexions des mécanismes est constituée par les contacts entre deux corps. Fréquemment, il y a un mouvement relatif ou une tendance vers ce mouvement entre les éléments en contact, ce qui entraîne des petits glissements à l'interface du contact. Il est nécessaire de prendre en compte l'existence de ces forces de frottement qui se produisent sur la surface et qui se combinent avec les forces normales entre les éléments en contact. Ainsi, le mouvement qui se produit à l'interface d'un contact peut être une autre source de frottement qui joue un rôle crucial dans la détérioration des surfaces.

Autrefois, on a défini l'usure comme une diminution de masse pour l'un et/ou l'autre des solides en contact. De cette manière, plusieurs lois d'usure ont été élaborées, souvent seulement valables sur les essais mêmes qui les ont mises en place.

L'usure n'est plus considérée comme une diminution de la masse d'un matériau, mais plutôt comme une diminution de la masse du système global, ce qui entraîne une diminution de la fonction du mécanisme, car le troisième corps évacué ne peut plus supporter la charge et participer à l'adaptation de la vitesse relative entre les deux "premiers" corps.

C'est dans ce cadre que nos recherches se déroulent. Dans ce mémoire, nous avons étudié les défauts causés par le phénomène d'usure observé dans les serpentins tubulaires des fours de la raffinerie RA2K. Nous avons examiné les différentes formes de ce phénomène, les contraintes qui affectent un tube qui a subi une diminution d'épaisseur, et nous avons analysé la situation en ce qui concerne la persistance du problème. Enfin, nous avons conclu des solutions et des conclusions.

Le travail exposé ici est divisé en quatre chapitres essentiels :

Le premier chapitre a pour objectif de situer le contexte de la raffinerie, de présenter l'étendue du site et d'explicitier ses missions.

Le second chapitre est consacré à détailler la distillation atmosphérique du topping, en plus les équipements essentiels, faire connaître le principe de fonctionnement des fours, ses différentes sections, les systèmes auxiliaires mais néanmoins essentiels, les caractéristiques effectives d'un four tubulaire et ses paramètres de fonctionnement.

Au chapitre trois, nous sommes ensuite intéressés au frottement qui peut causer le phénomène de l'usure qui peut faire des éclatements des tubes, les facteurs d'usure, les différents types d'usure.

Enfin, le chapitre quatre, est destiné à une situation concrète à laquelle nous avons pris part. Il s'agit d'une usure avancée sur un tube du serpentin du four F-102, suite à une vérification de la conception des tubes et en se basant sur l'historique des inspections des fours, nous avons déterminé les contraintes supportées par le tube et les possibilités de défaillance avec l'évolution régulière du problème.

# **Chapitre I**

## **Présentation du complexe Topping de condensat**

## I.1. Introduction

Le pétrole brut est l'une des plus importantes sources d'énergie dont dépend, en grande partie, le développement des nations, Depuis sa découverte, l'énergie du pétrole a réalisé un bond considérable, bouleversant ainsi la majeure partie des structures en matière de consommation énergétique.

Pour se mettre au-devant des pays en voie de développement, l'Algérie s'est mise à exploiter ses richesses naturelles en hydrocarbures (pétrole brut et gaz naturel). C'est ainsi que sont nées les raffineries de Hassi-Messaoud, In Amenas, Arzew, Skikda et Adrar, après celle d'Alger qui date depuis l'ère coloniale.

Le projet du complexe de Topping Condensat de Skikda, dénommé RA2K, est venu compléter une série de contrats de réalisation dans le pôle industriel de cette ville. Le contrat a été signé en 2005 et sa mise en exploitation en 2009.

Le pétrole et le condensat jouent un rôle dominant sur la scène énergétique. L'industrie pétrolière est un secteur extrêmement concurrentiel où la rentabilité est une obligation. C'est ainsi, que nous assistons à des évolutions technologiques importantes se traduisant par des raffineries de plus en plus complexes et qui nécessitent :

- Une meilleure connaissance des marchés, des mécanismes de formation des coûts et des outils d'optimisation.
- Une maîtrise des procédés, de leur performance, de leur souplesse d'utilisation et de leur potentiel d'exploitation.
- Une bonne connaissance des produits, de leurs caractéristiques, de leurs contraintes de mise en œuvre pour la faire en toute sécurité en préservant l'environnement.[1]

## I.2. Présentation du Topping de Condensat de Skikda

Le complexe topping condensat de Skikda (baptisé RA2K) a pour mission de traiter le condensat provenant des champs pétroliers algériens en vue de produire le butane, le naphta, le kérosène, le gasoil léger et le gasoil lourd. La capacité de traitement est de 5.000.000 t/an (pendant une période continue de fonctionnement de 330 jours). [1]

## I.3. Historique de la raffinerie

Le complexe de topping de condensat RA2K a été réalisé par la société chinoise CPECC en qualité de contractant EPC pour SONATRACH, filiale de l'entreprise CNPC entre les années 2005 et 2010. Le démarrage des unités process a eu lieu en 2009 et la réception des installations en 2010<sup>(1)</sup>.

Implantation et activités :

Le complexe Topping de Condensat (RA2K) est situé dans l'enceinte de la zone industrielle de Skikda à l'Est de la ville de Skikda en dehors du tissu urbain dans le périmètre de l'ancien aéroport, Comme présenté par la Figure 1 ci-après le complexe est délimité comme suit :

- Au Nord par la SOMIK, Eng/ZIK et le parc de stockage SAMSUNG ;
- A l'EST par la raffinerie RA1K et le Terminal TRC/RTE ;
- Au Sud par la commune d'Hamadi Krouma ;
- Et à l'ouest par Oued Safsaf et la ville de Skikda. [1]



Figure I. 1 : Localisation géographique de la raffinerie RA2k [1]

La raffinerie RA2K a pour objet le traitement du condensat issu des champs pétroliers algériens en vue de produire le Butane, le Naphta, le Kérosène, le Gasoil léger et le Gasoil lourd. En outre, des facilités seront installées pour le stockage, le traitement et le transfert du condensat et de ces produits. [2]

#### I.4. Organisation du complexe

L'organisation du complexe topping de condensat de Skikda (RA<sub>2</sub>K) se présente selon l'organigramme suivant :

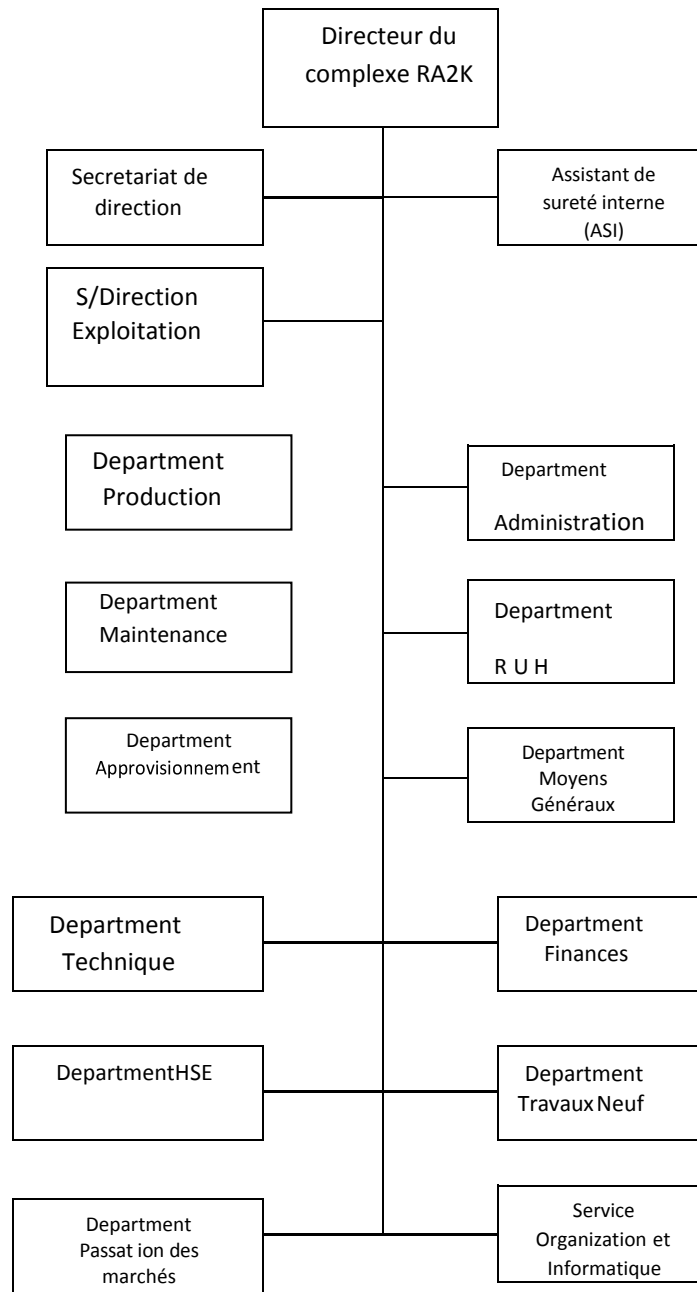


Figure I.2 : Organisation Du Complexe [1]

## I.5. Différentes unités du complexe

Cela concerne diverses unités de traitement : Unité Topping de Condensat (Unité-100), Unité de traitement de kérosène (Unité-200), Installations de stockage et de transfert de produits pétroliers (Unité-300), Système de torche (Unité-400) et Utilités (Unité-500). [2]

Une présentation des unités et installations principales est donnée ci-dessous :

### I. 5.1. L'unité Topping de condensât

Son objectif (Unité-100) est de distiller le condensât en Naphta léger non stabilisé, Naphta lourd, kérosène (Jet A1), Gasoil léger (LGO) et Gasoil lourd (HGO). Le Naphta léger non stabilisé est acheminé vers la section de stabilisation de Naphta pour séparer le propane/butane et le Naphta léger. Les Naphtas léger et lourd sont mélangés comme Naphta composé, lequel est acheminé vers l'aire de stockage. Le Kérosène de l'unité 100 est traité dans une unité de traitement de kérosène avale, pour l'élimination des acides naphthéniques et pour améliorer d'autres propriétés. Le gasoil léger et le gasoil lourd sont envoyés à leur stockage respectif comme produits. [3]

L'unité a été conçue pour répondre aux programmes de production suivants :

Cas A : Production maximale de Naphta et production maximale Gasoil (cas de base) ;

Cas B : Production maximale Kérosène Jet A1 ;

Cas C : Production maximale de Naphta et production minimale de Gasoil. [3]

Tableau I.1 : Modes d'exploitation de l'unité 100 [1]

Produits	Mode d'exploitation		
	(Cas A)	(Cas B)	(Cas C)
Butane	111.9	111.9	111.9
Naphta	4038.1	3470.1	4038.1
Jet A1	-	992.5	425.6
Gasoil Léger	724.9	299.9	299.9
Gasoil Lourd	115.2	115.2	115.2
Pertes	9.9	10.4	9.3
Total	5000	5000	5000

L'unité peut être divisée en un certain nombre de sections :

Train d'échangeurs de préchauffage, Section de la colonne de préfractionnement, Section de la colonne de distillation atmosphérique, Stabilisation de naphta, Dépropaniseur, et la Section de la colonne sous vide, tel que montré sur la Figure I.3

Chacune de ces sections est décrite brièvement dans les paragraphes suivants. [4]

#### I.5.1.1. Train d'échangeurs de préchauffage

La charge de condensât à partir des bacs de stockage est chauffée successivement par 8 niveaux d'échangeurs de chaleur 100-E-101 à 100-E-108 avant d'entrer dans la colonne de préfractionnement (100-T-101). Le train d'Echangeur de Préchauffage est divisé en 2 branches parallèles en vue de faciliter le fonctionnement à 50 % du débit. Ensuite, la charge pénètre dans la colonne de préfractionnement sous contrôle de débit en cascade avec le niveau de la colonne. [4]

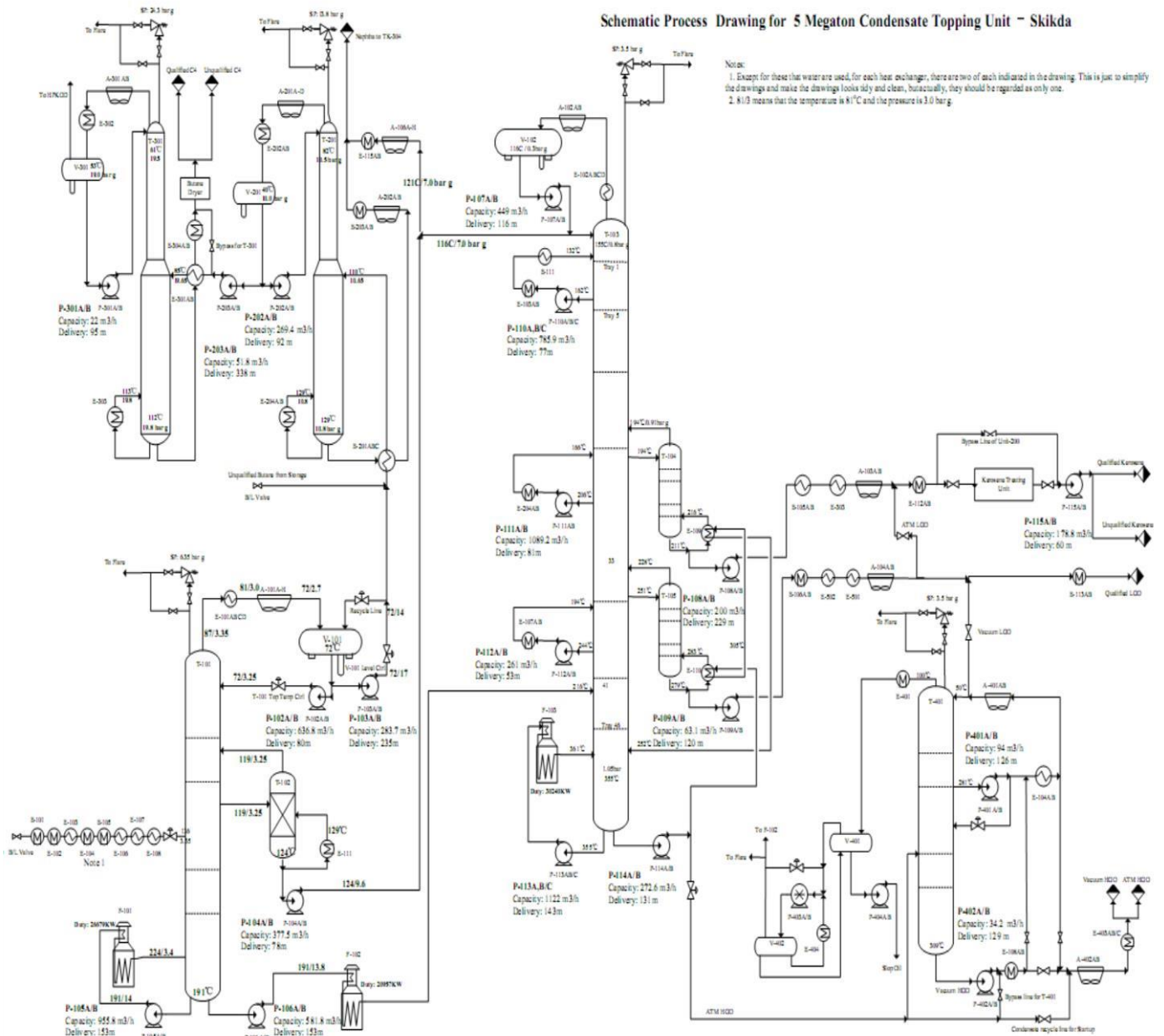


Figure I.3 : schéma process d'unité 100 de topping [1]

### I.5.1.2. Section de la colonne de distillation

La colonne de préfractionnement (100-T-101) est équipée de 35 plateaux. La charge entre dans la colonne au niveau du 28<sup>ème</sup> plateau et est séparée en trois coupes principales :

Fond du préfractionneur : Divisé en deux parties, dont la première va subir un rebouillage dans le four rebouilleur 100-F-101 avant d'être renvoyé au fond de la colonne, et la deuxième est envoyé à la section de distillation atmosphérique ;

Naphta de soutirage : Retiré du stripper 100-T-102 à partir du plateau 15, le stripper est équipé de 6 plateaux et un rebouilleur de type thermosiphon ;

Naphta de tête : Les vapeurs de tête de la colonne sont complètement condensées et le liquide est recueilli au Ballon de reflux du préfractionneur.

À partir de ce ballon de reflux, le Naphta d'envoyé sous contrôle de niveau, à la section de stabilisation de Naphta pour récupérer le GPL. Le reflux est renvoyé en tête de la colonne, sous contrôle de température en cascade avec le débit.[4]

### I.5.1.3. Section de la colonne de distillation atmosphérique

Le produit provient du fond de la colonne de préfractionnement est envoyé au four atmosphérique 100-F-102, dont il est chauffé de 191°C à 216°C environ, ce produit est acheminé par la suite comme charge pour la colonne atmosphérique au 41<sup>ème</sup> plateau.

La colonne de distillation atmosphérique 100-T-103 est équipée de 46 plateaux, 2 soutirages latéraux et 3 pump-arounds, quatre coupes sont obtenues par cette distillation. [4]

- Coupe de tête Naphta ;
- Coupe de Kérosène ;
- Coupe de Gasoil léger ;
- Coupe de fond.

### I.5.1.4. Section de stabilisation de naphta

Dite débutaniseur est conçue pour stabiliser le naphta de la tête du préfractionneur pour récupérer le GPL. Le naphta de la tête du préfractionneur est préchauffé au niveau de 100-E- 201 et ensuite alimenté à 100-T-201 (Débutaniseur) au plateau 26. Au niveau de T-201, équipée de 50 plateaux de fractionnement, la charge est séparée en produit supérieur (GPL brut) et naphta stabilisé. Le

---

rebouillage du fond est assuré par un rebouilleur thermosiphon 100-E-204.[5]

#### **I.5.1.5. Section du dépropaniseur**

Le dépropaniseur est conçu pour séparer le GPL brut en butane et propane contenant des traces d'éthane. Le propane est envoyé au four en tant que gaz combustible et le butane est envoyé au dispositif de séchage de butane 100-PKG-301 pour le séchage, et ensuite il est acheminé au stockage en tant que produit. Le GPL de la section de stabilisation de Naphta est d'abord chauffé par l'échangeur 100-E-301 et ensuite alimenté à 100-T-301 (Dépropaniseur) au plateau 27, lequel équipé de 56 plateaux de fractionnement. [5]

#### **I.5.1.6. Section du sécheur de butane**

L'installation de séchage du butane a été calculée pour traiter 25,2 ton/h de butane, et pour objectif de sécher le butane jusqu'à 20ppm. [5]

#### **I.5.1.7. Section de la tour sous vide**

Le but de la tour sous vide T-401 est de récupérer une partie de LGO contenu dans le résidu atmosphérique issue du fond de la tour atmosphérique. Le LGO sous vide est mélangé avec le LGO atmosphérique, et le HGO du fond de la tour sous vide est envoyé à stockage. Le fractionnement est effectué au moyen de 2 zones de garnissages assurant le contact liquide-vapeur et séparé en deux coupes :

- Coupe latérale (Gasoil léger) ;
- Coupe de fond (Gasoil lourd). [6]

#### **I.5.2. L'unité de traitement de kérosène**

Destinée (Unité-200) à la purification du kérosène produit par la colonne de distillation atmosphérique 100-T-103. Sa mise en service dépendra des caractéristiques de kérosène. Elle ne peut être démarrée qu'après la mise en service d'unité 100 au cas où le kérosène nécessiterait des traitements. Cette unité consiste en trois parties

- Traitement de Kérosène ;
- Traitement de résidus caustique ;
- Préparation et stockage. [6]

### **I.5.3. Le stockage et le transfert des produits**

Dispose (Unité-300) d'installations pour la réception, le stockage et l'alimentation du condensât, ainsi que le stockage et le transfert des produits fini tels que le naphta, le kérosène (jet A1), le gasoil léger, le gasoil lourd, et butane.

Le stockage du condensât issu de la terminale de la direction RTE se fait dans trois réservoirs de 25000 m<sup>3</sup> assurant une autonomie de trois jours environ de stockage.

Les autres produits finis seront stockés dans des bacs de stockage intermédiaire correspondant à une autonomie d'exploitation de quatre jours environ, avant d'être transférés vers les installations de stockage correspondantes au niveau de la raffinerie RA1K.[2]

### **I.5.4. L'unité de torche**

A été (Unité-400) conçus dans le complexe pour éliminer sans risque toute perturbation sur les unités de traitement et de stockage par des évacuations d'urgence. Le système de torche sans fumées par injection de vapeur est équipé d'un collecteur de torche, de ballon de séparation, de garde hydraulique et d'une colonne montante de torche d'une hauteur d'environ 120 mètres.[5]

### **I.5.5. L'unité d'utilités**

Comporte (Unité-500) les installations de réception, génération, traitement, stockage et distribution des diverses utilités, et est composée de :

#### **I.5.5.1. Unité 501-Traitement des eaux usées**

Un système de protection d'environnement auxiliaire de la raffinerie qui sert au traitement des eaux usées provenant des différentes unités, ainsi que les blocs du personnel.[3]

#### **I.5.5.2. U502- Tour de refroidissement**

Assure le traitement et le conditionnement des eaux de refroidissement pour les unités de production. La capacité de traitement est de 1000m<sup>3</sup>/h

#### **I.5.5.3. U503- Réseaux d'alimentation et drainage d'eau**

L'eau industrielle de l'usine est livrée à partir du réseau de distribution d'eau de la zone industrielle de Skikda pour :

- L'appoint du système du réseau de lutte contre l'incendie ;

- La maintenance et l'exploitation ;
- Les besoins de consommation domestique du personnel.
- Un système de traitement d'eau potable est équipé dans l'usine. Il a une capacité de traitement de 7,5m<sup>3</sup>/h. [7]

**I.5.5.4. Unité 504 réseau anti-incendie**

Assure l'appoint du système du réseau de lutte contre l'incendie pour les différentes unités. [7]

**I.5.5.5. U505- Air comprimé, vapeur et azote**

La production de l'air comprimé (air service et air instruments) est assurée par deux compresseurs d'air, l'air instruments est préalablement séché et stocké dans deux ballons de stockage tampon avec une autonomie de fonctionnement de 30 minutes La vapeur est livrée par la raffinerie RA1K de Skikda et l'azote est alimenté par ENGI de Skikda. [7]

**I.6. Vue générale sur les fours de la raffinerie RA2K**

La portée de la charge aux conditions thermiques requises dans la raffinerie se fait par le biais des fours tubulaires, Trois fours sont installés au niveau de l'unité 100, les fours 100-F-101, 100-F-102, 100-F-103, sont illustrés sur la figure ci-après.

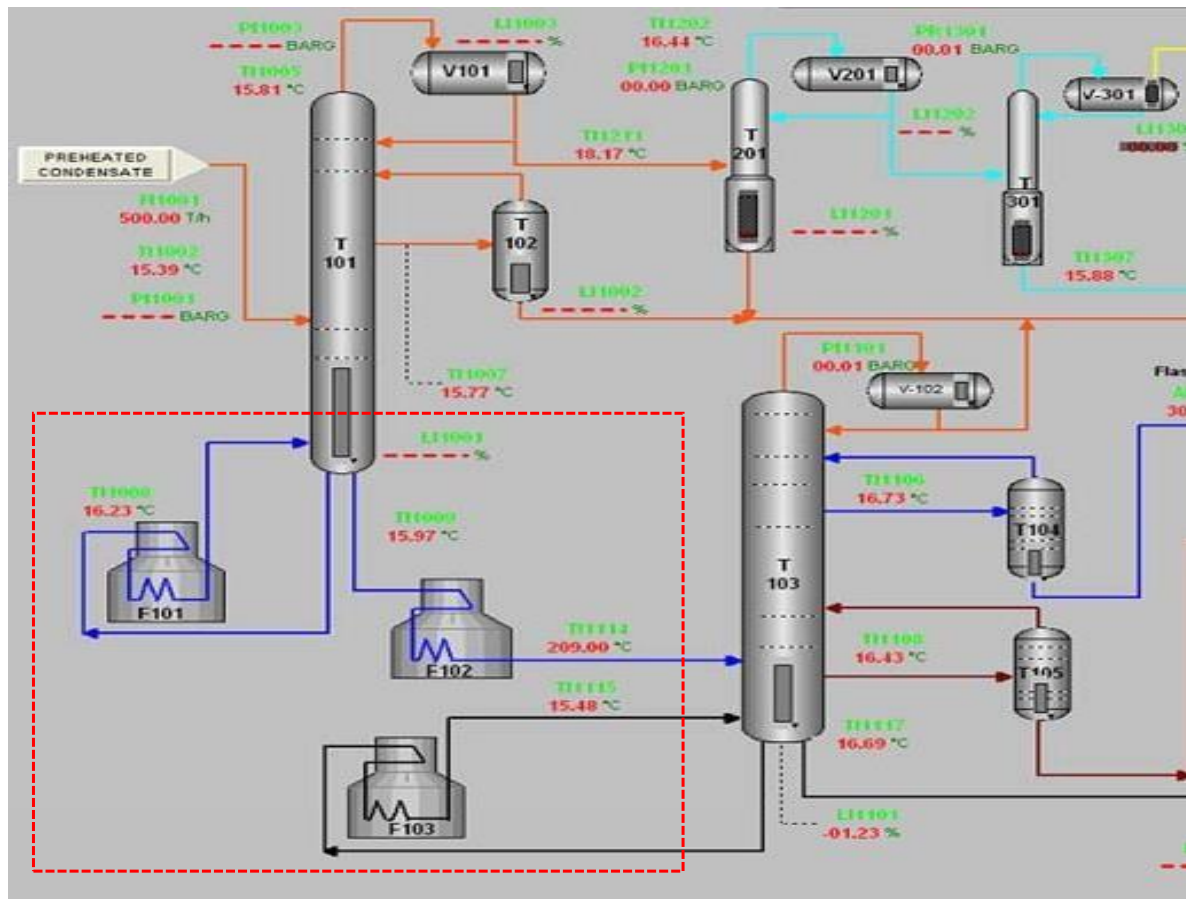


Figure I. 4 : Implantation des fours du topping de condensât [1]

Les trois fours du topping de condensat ont pour rôle de réchauffer les produits des fonds des Colonnes 100-T-101 et 100-T-103 (le cas des fours rebouilleurs F-101 et F-103), ainsi que de porter la charge à l'entrée de la colonne atmosphérique aux conditions thermique requises (le cas du four atmosphérique F-102) ; L'apport de chaleur dans ce cas est un fait indispensable

pour conserver la marche régulière du processus, en outre, la défaillance ou la dégradation de l'un ou de plusieurs de ces équipements est intolérable, vue les conséquences qui vont être engendrer, à priori la diminution du taux de marche, l'arrêt totale de l'unité de production, ainsi que des dégâts matériels, économique et humaines dans des cas extrêmes causer par des problème persistant ; il est nécessaire d'établir un programme d'inspection ainsi qu'un suivi régulier afin de garantir une bonne fonctionnement des équipements et de les recommandation adéquates des intervention pour prolonger la durée de vie de ces machines. [7]

De ce principe les inspections réglementaires durant les arrêts programmés en 2012, 2013 et 2016, ont montré une constatation inquiétante, s'agissant de marques d'usure aux endroits des supports guides intermédiaires du serpent, la perte en matière étiré dans tous les trois fours au même endroit, et à différentes fréquences. [7]

### **I.7. Conclusion**

Dans le présent chapitre, on a eu une vue générale sur la raffinerie RA2K, qui est conçue essentiellement pour la distillation du condensat, afin de produire plusieurs coupes ; On a vu ainsi l'importance donnée aux fours, et leur rôle névralgique dans le procédé de raffinage ; cela implique de donner plus d'attention à ces équipements et de contourner les problèmes de fonctionnement qui concernent.

De ce fait, il est nécessaire, avant tout, d'y avoir une vue rigoureuse au sujet des fours tubulaires, de leur technologie de construction, de leur fonctionnement, ainsi que ses éléments de constitution.

**Chapitre II**  
**Description de l'unité**  
**de distillation atmosphérique**

## II.1. Définition

La distillation consiste à séparer les mélanges liquides et les solutions en leurs composants distincts lorsque leur température d'ébullition est élevée. La distillation atmosphérique est la méthode de base pour le traitement du brut. Le produit brut est constitué d'une série d'hydrocarbures présentant des caractéristiques variées, et afin d'être utilisé de manière adéquate, il est nécessaire de le diviser en groupes présentant des caractéristiques bien définies et plus homogènes. Le processus de distillation permet de diviser le brut en utilisant la disparité entre les points d'ébullition des différents groupes d'hydrocarbures.

. Les spécificités de ces groupes sont en relation avec les exigences particulières du marché pour les produits directement utilisables et celles des unités de processus pour les produits destinés à un traitement ultérieur. Dans la réalité, la séparation du pétrole brut se fait dans une seule colonne (atmosphérique ou sous vide) avec des soutirages latéraux. La colonne de fractionnement est un dispositif cylindrique vertical avec des plateaux minces qui garantit un contact étroit entre la phase liquide et la phase vapeur. Le four fournit la chaleur indispensable à la distillation, un dispositif de transfert thermique qui génère de l'énergie par la combustion d'un combustible [8]

## II.2. Généralité sur les distillations industrielles

Le raffinage débute par la séparation des hydrocarbures en fonction de leur température d'ébullition.

Les deux méthodes principales de séparation comprennent :

La distillation à les pressions atmosphériques et La méthode de distillation à vide.

Après cette étape, on obtient des produits connus sous le nom de (bases). [9]

### II.2.1. Principe de La distillation atmosphérique

On chauffe le brut à une température d'environ 350°C, puis on le distille dans une colonne de 40 à 60 mètres de haut. Les produits dans cette colonne sont classés selon leur température d'ébullition et leur pression de 1 à 3 atmosphères.

Les plateaux qui permettent un contact entre la phase vapeur ascendante et la phase liquide descendante sont situés le long de cette colonne.

La partie supérieure de la colonne contient les produits les plus légers (température d'ébullition à environ 30°C) et la partie inférieure contient les produits les plus lourds (température d'ébullition à plus de 375°C).

Effectivement, les plus lourds hydrocarbures demeurent liquides, tandis que les molécules de masse faible ou moyenne se transforment en vapeur et s'élèvent dans la colonne. Pendant leur ascension, elles se refroidissent et se transforment en liquide et sont recueillies à divers niveaux sur les plateaux.

Une température moyenne est établie à chaque étage de la colonne de distillation, entre les points de rosée (condensation) et de bulle (vaporisation) des produits que l'on souhaite récupérer.

En se basant sur la colonne de distillation, on peut obtenir :

Un carburant principal (gaz non condensable, GPL, essence complète). Trois tronçons latéraux (kérosène, gasoil léger, gasoil lourd) sont présents. Un résidu de l'air au fond. Chaque produit latéral de la colonne principale est réduit à sa propre colonne de découpe ou les plus légers sont éliminés. Le stripping est réalisé en utilisant de la vapeur à basse pression, chauffée à haute température pour le gasoil léger et lourd, et en rebouillant le kérosène gazeux, liquide ou

Solide. [9]

### **II.2.2. La Distillation sous vide**

La distillation sous vide est réservée au fractionnement des produits contenant des hydrocarbures lourds dont les températures d'ébullition normales seraient supérieures au seuil de craquage, où à la redistillation des produits nobles qu'un nouveau chauffage risquerait d'altérer. On trouve ainsi en raffinerie le fractionnement sous vide du brut réduit atmosphérique, pour obtenir des coupes lubrifiantes de base, la redistillation des huiles après traitement au solvant, la redistillation des essences spéciales et la préparation de charge des unités de craquage pour sortir un gasoil sous vide à partir du résidu atmosphérique. [10]

## **II.3. Les équipements de distillation atmosphérique :**

### **II.3.1. Colonnes**

#### **II.3.1.1. Définition**

La colonne de distillation est une installation verticale cylindrique dont la hauteur varie de 40 à 60 mètres. Elle est vêtue. Les plateaux sont des cloisons horizontales qui ont pour fonction de garantir un contact intime entre le liquide et la vapeur afin de favoriser l'équilibre des phases à la suite des transferts de chaleur et de matière, Elle se divise en trois zones :

#### **a. Zone de flash ou d'expansion**

La zone de séparation de la charge en phase vapeur et en phase liquide est construite dans le but de garantir une bonne séparation des phases et de préserver les parois de la colonne contre l'érosion. La matière première entre par des tubulures tangentielle et se dirige en spirale vers le centre grâce à une plaque métallique placée dans le centre verticalement. [12]

### b. Zone de rectification

Elle est équipée de plateaux pour faciliter la correction. Selon la nature de la charge à traiter et les fractions que l'on souhaite obtenir, le nombre de plateaux varie de 22 à 45%. [11]

### c. Zone de d'épuisement

La partie la plus lourde du pétrole s'accumule dans cette zone. Le résidu atmosphérique sera utilisé comme charge pour la distillation sous-vide, où la vapeur d'eau sera injectée afin d'éliminer les composants légers volatils. Il y a également dans cette zone des plateaux dont le nombre varie de 6 à 8. [12]

## II.3.1.2. Les différents types des plateaux

Les colonnes sont composées de différents types de plateaux (étages), et chaque type de plateau diffère de l'autre en termes de construction et d'efficacité. Il y a un titre d'exemple :

**a. les plateaux perforés** Les premiers plateaux utilisés dans l'industrie des colonnes étaient destinés à être rectifiés. Leur prix est plus abordable, leur nettoyage est plus facile, mais ils sont également moins rentables (moins efficaces) et ils comportent des risques d'entraînement du liquide par la vapeur ascendante. De plus, en cas de baisse de la pression, ces plateaux sont vulnérables à la pollution. [12]

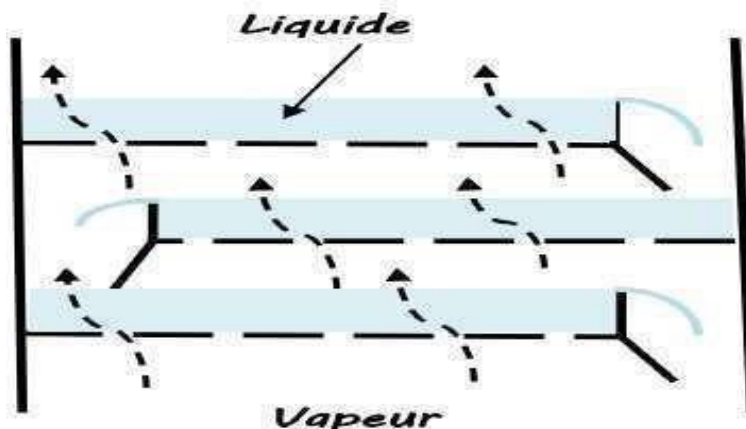


Figure II. 1 : Plateaux perforés. [12]

### b. Les plateaux à calottes

Ils offrent une surface importante et un contact efficace entre la phase liquide et la phase vapeur, ce qui évite les problèmes de dégouttement ou d'entraînement car en cas de baisse de pression, les calottes se referment. Ainsi, ils offrent une plus grande rentabilité et efficacité par rapport aux plateaux perforés, mais ils sont difficiles à nettoyer et plus coûteux. [13]

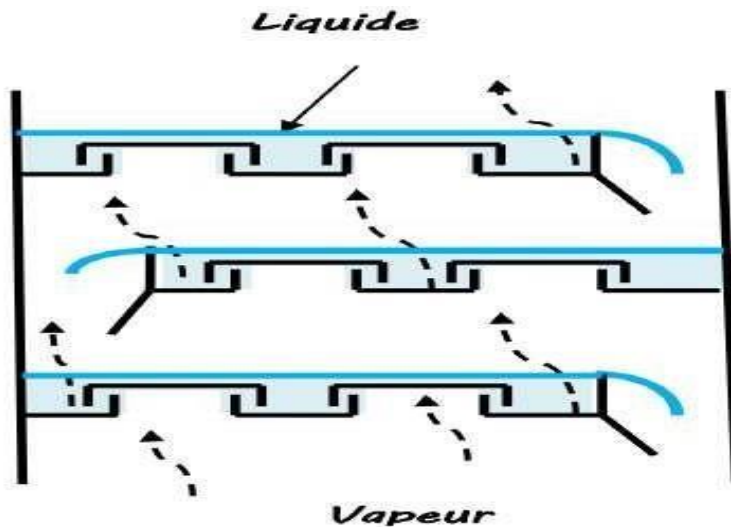


Figure II. 2 : plateaux à calottes [13]

## II.3.2. Rebouilleurs

### II.3.2.1. Généralités sur le rebouilleur

Le rôle des rebouilleurs est crucial dans différents processus industriels, car ils sont des éléments indispensables dans les unités de distillation pour séparer les mélanges liquides. Il est essentiel de saisir les données générales concernant les rebouilleurs afin d'améliorer l'efficacité et la productivité des processus. La fonction principale des rebouilleurs est de fournir la chaleur requise pour vaporiser une partie de la charge liquide dans une colonne de distillation, ce qui permet de séparer les composants en fonction de leur point d'ébullition. [14]



Figure II. 3 : rebouilleur vertical [14]

### II.3.2.2. Types des rebouilleurs

#### a. Rebouilleurs à circulation naturelle

- Rebouilleur à faisceau immergé type Kettle,
- Thermosiphon vertical,
- Thermosiphon horizontal,
- Rebouilleurs internes de colonne

#### b. Rebouilleurs à circulation forcée

- Rebouilleur horizontal,
- Rebouilleur vertical,
- Rebouilleur à film tombant. [15]

Chacune offrant ses propres bénéfices et ses propres applications en fonction des exigences du processus. Le rebouilleur fonctionne en transférant la chaleur d'une source de chaleur vers la charge

liquide, habituellement par un échangeur de chaleur, ce qui provoque la production de vapeur qui monte dans la colonne de distillation. [16]

Il est important de prendre en compte plusieurs facteurs lors de la sélection du type de rebouilleur :

- La nature du fluide (présence de solides dissous ou en suspension),
- La nature du fluide chaud (liquide, vapeur, gaz, voire chauffage par effet joule),
- La tendance à l'encrassement,
- La fraction à vaporiser,
- La charge thermique,
- Les températures d'approche,
- La nature des matériaux à employer pour la construction,
- L'espace disponible pour l'installation. [16]

### II.3.3. Condenseurs

Le condensateur joue un rôle crucial dans la centrale électrique. Ce système permet de transférer la chaleur latente présente dans la vapeur à la décharge de la turbine à vapeur TV vers l'eau de refroidissement [17]

#### II.3.3.1 Classification et utilisation des condenseurs :

On divise les condenseurs en deux grandes catégories :

- Les condenseurs par surface, où la vapeur à condenser et le fluide réfrigérant ne sont pas en contact, avec une surface d'échange s'interposant entre eux ;
- Les condenseurs par mélange, où, comme leur nom l'indique, la vapeur à condenser et le fluide réfrigérant sont totalement mélangés.

Leur utilisation est très limitée en raison de l'impossibilité de mélanger la vapeur avec l'eau de refroidissement, généralement de l'eau pure.

Afin de condenser une vapeur saturée, il est nécessaire d'extraire une quantité de chaleur spécifique, appelée enthalpie de vaporisation, et de la transmettre à une source froide. Dans la plupart des cas, un condenseur utilise une source froide, généralement de l'eau : eau douce (rivière) ; eau de mer et parfois l'air. Les principales applications des condenseurs incluent :

- La production de l'énergie ;
- L'industrie chimique ;
- La technique du froid. [18]

### II.3.3.2. Types de condenseurs

Les deux types les plus utilisés

#### a. Condenseurs ventilés :

L'air est forcé de circuler à travers le condenseur par l'action d'un ventilateur. Il est alors question de ventilateur-condenseur. Ces mécanismes sont les plus couramment employés dans le domaine des climatisations. [19]



Figure II. 4 : condenseur à air [19]

**b. Condenseur tubulaire ou multitubulaires :**

Ce genre d'échangeur s'adresse principalement à l'industrie, car il est destiné aux grandes entreprises. On dispose de nombreux tubes en position horizontale, soudés à chaque extrémité à deux viroles, séparant ainsi la partie du fluide frigorigène de l'eau. L'eau se déplace à travers les tubes pendant que le liquide frigorigène se retrouve en condensation dans le réservoir extérieur, appelé « la calandre ». L'avantage de ce genre de condenseur est qu'il est démontable et qu'il peut être nettoyé mécaniquement. [20]

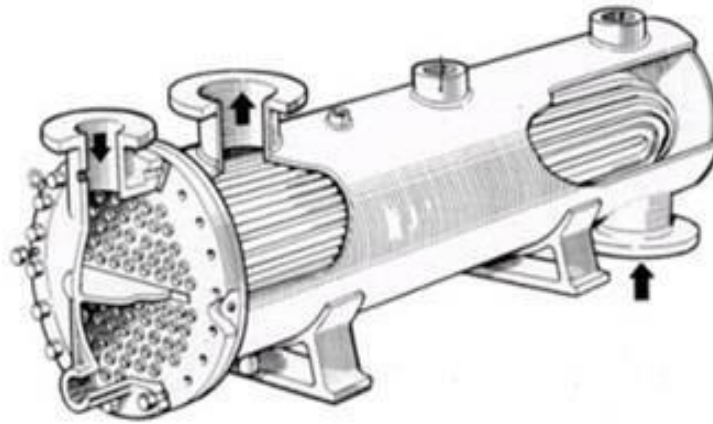


Figure II. 5 : condenseur tubulaire. [21]

**II.3.3.3 Fonctionnement général d'un condenseur :**

De nombreuses technologies de condenseur existent, mais elles sont toutes basées sur les mêmes processus physiques d'échanges, c'est-à-dire : - la conduction qui correspond aux échanges à travers les parois (le plus souvent métalliques), - la convection qui correspond aux échanges entre les fluides et les parois, - le rayonnement qui correspond aux échanges radiatifs entre les fluides et les parois (principalement infra rouge) bien que ce dernier soit souvent négligeable (car considéré uniquement pour un fonctionnement à haute température).

Trois modes d'écoulement sont également identifiés :

- celui à co-courants : les fluides se déplacent parallèlement et dans la même direction ;
- celui à contre-courants : les fluides se déplacent parallèlement mais dans des directions opposées. et

celui à courants croisés : les fluides se déplacent perpendiculairement entre eux.

La qualité et l'efficacité du transfert sont également influencées par le mode de circulation. Un condenseur appelé anti-méthodique (ou à Co-courants) implique que les deux fluides (chaud et froid) entrent du même côté de l'échangeur. La configuration appelée méthodique correspond à la circulation des fluides en contre-courants. Cette configuration est appelée méthodique car elle permet d'obtenir les meilleures performances des échangeurs.

Effectivement, lors d'une circulation à co-courant des fluides, il est impossible que la température de sortie du fluide chaud soit inférieure à la température de sortie du fluide froid, tandis qu'à contre-courant, il est envisageable d'abaisser la température du fluide chaud à une valeur qui tend vers la température d'entrée du fluide froid. Ces différences seront illustrées par des illustrations graphiques.

[21]

### II.3.4. Fours

La majorité des installations de raffinerie ou de pétrochimie utilisent un four à chauffage direct pour fournir les calories nécessaires au processus mis en place. Les calories générées par la combustion sont transmises par les mécanismes de radiation, de conduction et de convection au fluide à réchauffer, qui circule dans un serpentin tubulaire ou un faisceau de tubes. C'est pourquoi on appelle ces appareils les « fours tubulaires ». [22]

#### II.3.4.1. Usage et domaines d'utilisation

Selon l'effet de l'apport de chaleur au fluide de procédé, on peut distinguer :

- **Fours de réchauffage de fluide sans changement d'état physique :**

Dans lesquels la charge liquide ou vapeur ne reçoit que de la chaleur sensible.

Cela se produit par exemple :

- Les fours utilisés dans les unités de reformage catalytique ou d'hydrotraitement de coupe de tête de distillation du pétrole brut sont chauffés à la température requise pour permettre le déroulement des réactions chimiques sur les lits de catalyseur. [22]

- **Fours de réchauffage de liquide avec vaporisation partielle** : Les unités de distillation sont particulièrement équipées de fours de distillation atmosphérique ou sous-vide ou de fours rebouilleurs. Au sein de ces fours, la charge est chauffée par la chaleur latente afin d'atteindre le niveau de vaporisation nécessaire. [22]
- **Fours de réchauffage de fluide avec réaction chimique**

Il est possible de comparer le faisceau tubulaire du four à un réacteur chimique réel.

Ce genre de four est fréquemment utilisé dans les unités de craquage thermique :

- Évaporation thermique de distillats ; - Évaporation de résidus ; - Évaporation à la vapeur (production d'éthylène) ; - Évaporation à la vapeur (production d'hydrogène). [22]

#### **I.3.4.2. Différents types des fours tubulaires**

Plusieurs configurations sont employées pour la fabrication des fours tubulaires. En réalité, les fours se distinguent par leur structure de chambre de combustion et leur disposition lorsque la zone de convection est présente.

Les fours peuvent être divisés en deux catégories principales : les fours dont les tubes de la zone de radiation sont horizontaux et ceux dont ils sont verticaux. [23]

**a. Fours tubulaires horizontaux**

On peut distinguer plusieurs types dans cette catégorie des fours

- **Fours à convection**

L'intérêt historique de ce type de four est mentionné, car les premiers fours tubulaires construits ont été de ce type. Cependant, leur capacité est limitée et les tubes des rangées inférieures sont exposés à des surchauffes préjudiciables. [23]

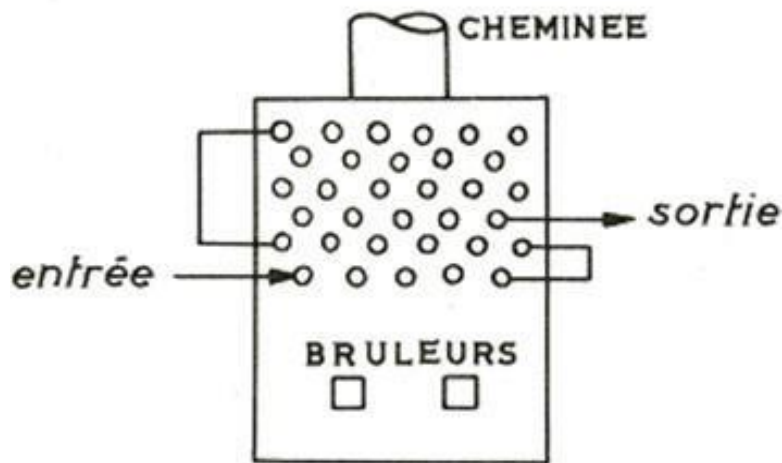


Figure II. 6 : schéma d'un four à convection. [23]

- **Fours classiques (box heater)**

Ces fours ont une zone de radiation parallélépipédique dont la plus grande longueur est horizontale, les tubes sont disposés horizontalement le long des parois latérales les plus longues, les brûleurs sont généralement sur le sol, ce type de four se caractérise principalement par l'existence d'un plan de symétrie permettant d'installer un grand nombre de brûleurs sur le sol, et dans certains cas, la zone de radiation est divisée en deux cellules disposées parallèlement et surmontées d'une zone de convection commune. [23]

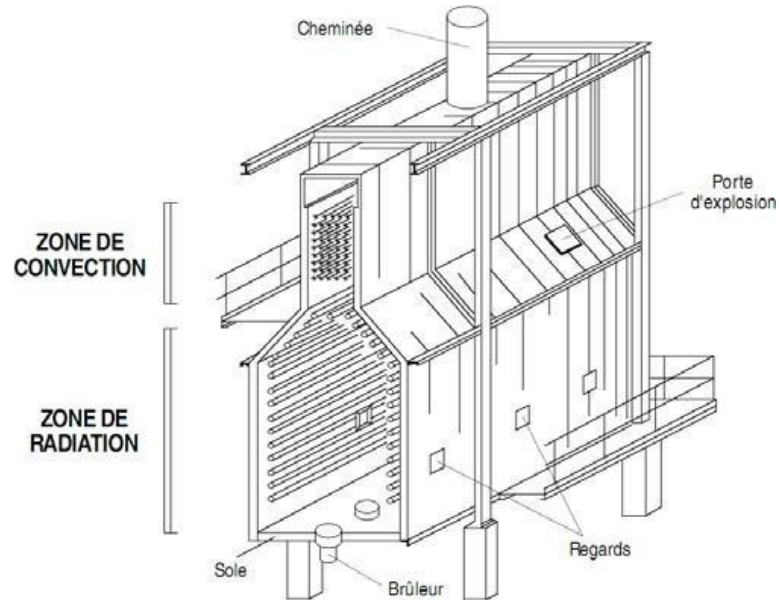


Figure II. 7: Four Classique [23]

- **Fours cabines**

Ce type de fours, comme Les fours verticaux, par exemple, sont de plus en plus utilisés ; Les capacités moyennes et importantes sont parfaitement adaptées et peuvent être utilisées avec un taux de transfert élevé et régulier. [24]



Figure II. 8 : Four cabine [24]

### b. Fours cylindriques verticaux

Ce genre de fours peut être employé dans toutes les capacités, des plus petites aux plus grandes, et il convient à la combustion du combustible et du gaz. [24]

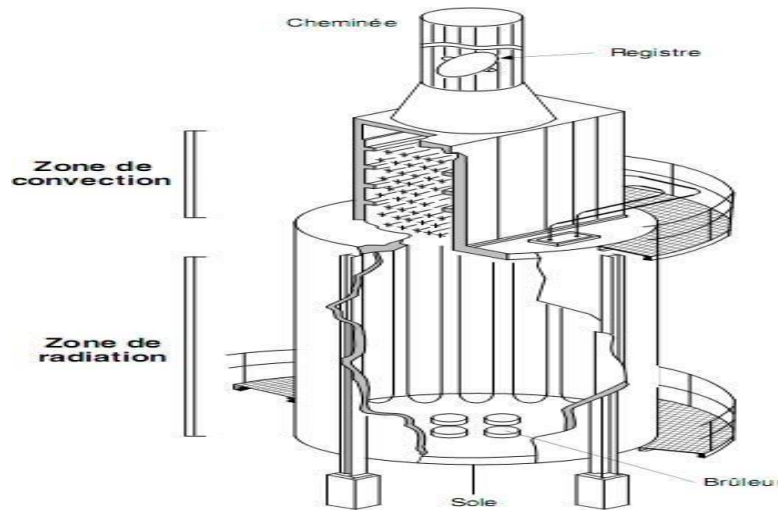


Figure II.9 : Coupe d'un four cylindrique vertical [24]

#### I.3.4.3 Description et construction des fours

Un four tubulaire est composé d'une structure métallique de différentes formes, généralement parallélépipédique ou cylindrique. [25]

Un four classique comporte :

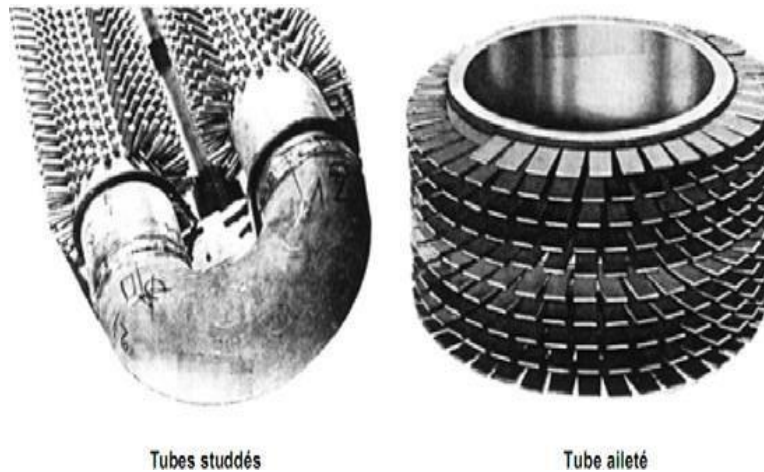
##### a. Zone de radiation

Elle correspond à celle où les tubes sont directement exposés à la flamme et reçoivent la chaleur principalement par radiation. En réalité, cette région constitue, à proprement parler, la zone de combustion où la flamme se propage. [25]

##### b. Zone de convection

Elle se trouve à la sortie des fumées de la chambre de combustion et se compose d'un ensemble de tubes disposés parallèlement ou perpendiculairement à la direction des fumées. Dans les deux cas, l'objectif est d'atteindre une vitesse suffisante pour les fumées afin d'accroître le coefficient d'échange.

Il est possible de garnir les tubes de cette zone d'ailettes ou d'aiguilles (studs) pour augmenter la surface d'échange. L'efficacité d'un four avec une zone de convection est plus élevée que celle d'un four avec une seule zone de radiation. [25]



#### I.3.4.4. Enveloppe métallique (casing)

Il est nécessaire d'avoir une résistance adéquate pour faire face aux actions du vent et supporter le faisceau tubulaire. Un garnissage réfractaire isolant protège la paroi interne de l'enveloppe, notamment celle de la chambre de combustion, contre l'effet de la température pour diminuer les pertes calorifiques à l'extérieur. [26]

#### I.3.4.5. Matériaux réfractaires et isolants

Les parois internes du four sont recouvertes d'un mur en briques réfractaires ou d'une couche de béton réfractaire.

Les argiles ou la terre de diatomée sont généralement les produits réfractaires utilisés dans les fours de raffineries. En plus de leur résistance, ces produits présentent une faible conductivité calorifique, ce qui les rend isolants en même temps.

Quand la chambre de combustion atteint une température extrêmement élevée, le garnissage réfractaire est composé de plusieurs couches. Entre la dernière couche de briques et la charpente métallique est placée une couche d'isolant (laine de verre ou de roche) qui permet de diminuer les pertes calorifiques. Les exemples d'ancrage au casing de béton et de briques résistantes sont illustrés dans la figure II.11. [26]

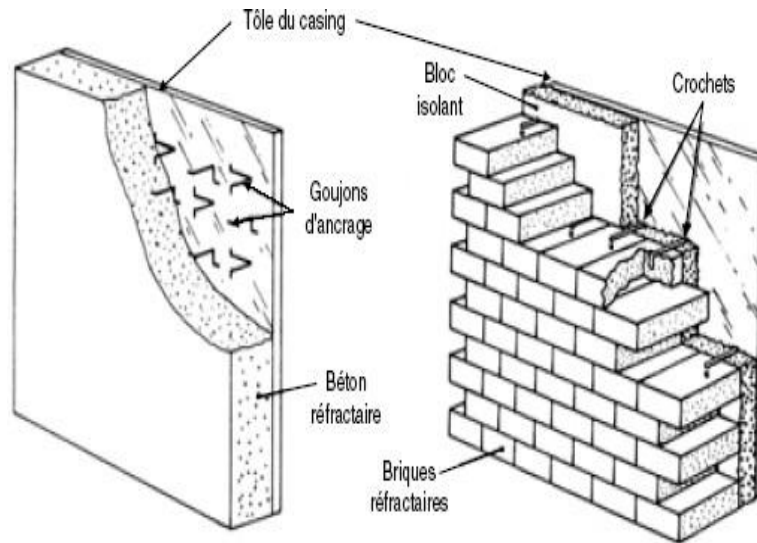


Figure II. 11 : Disposition du garnissage réfractaire par rapport au casing [26]

#### I.3.4.6. Tubes et accessoires du faisceau tubulaire

À l'exception de certains fours cylindriques verticaux où un serpentin hélicoïdal est utilisé, le faisceau tubulaire est généralement composé de tubes d'acier droits disposés parallèlement les uns aux autres. Le passage d'un tube à l'autre se fait soit par un coude soudé à 180°, soit par une boîte de retour soudée ou mandrinée aux tubes.

Les tubes sont lisses en zone de radiation, tandis qu'en zone de convection, ils sont équipés d'ailettes extérieures pour améliorer le transfert de chaleur.

Le métal devrait posséder des caractéristiques mécaniques adéquates à la chaleur. Il est bien connu que l'acier perd sa résistance mécanique lorsque la température augmente et que le métal subit le phénomène du fluage.

La corrosion joue un rôle essentiel dans le choix de la nuance d'acier. D'un côté, il y a l'oxydation de la surface du tube causée par les fumées chaudes, et de l'autre côté, il y a la corrosion causée par le fluide réchauffé. En ce qui concerne les fluides corrosifs, le métal sélectionné est déterminé par le type de corrosion à anticiper.

Les supports des tubes sont également exposés à des températures extrêmement élevées, bien supérieures à celles des tubes, car elles ne sont pas refroidies comme les tubes par le flux de fluide. Ces pièces sont fabriquées à partir de fontes ou d'acier résistant. [27]

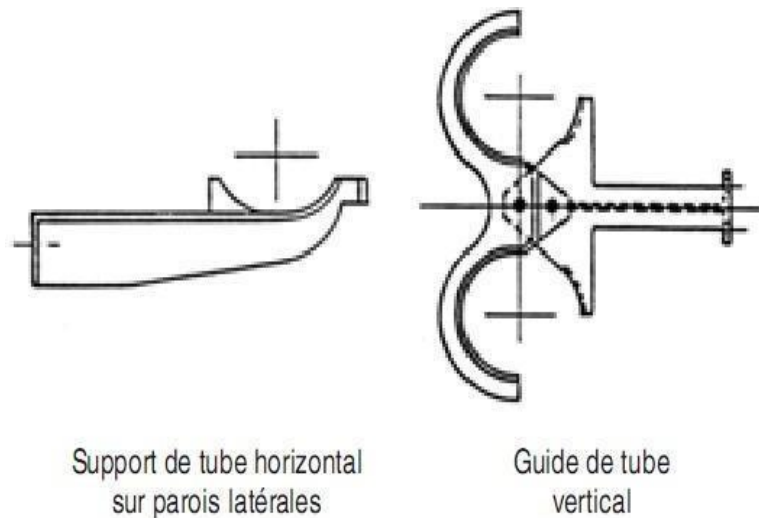


Figure II. 12 : Supports des tubes de la zone de radiation [27]

#### I.3.4.7. Brûleurs

Leur fonction consiste à effectuer le mélange intérieur de l'air et du combustible afin d'obtenir une combustion totale. Des volets permettent l'introduction de l'air de combustion en raison de la dépression qui existe dans le four. Le gaz ou l'huile, combustible, se déverse dans le courant d'air au milieu d'un ouvrage réfractaire qui, par la chaleur qu'il émet, maintient la flamme en place.

On peut classer les brûleurs en fonction du combustible ou de la circulation de l'air de combustion. [28]

##### a. Classification selon le combustible

Les brûleurs sont conçus pour brûler soit du gaz, soit de l'huile, soit les deux (mixtes).

- **Brûleurs à gaz :**

Il existe deux types : ceux qui sont pré-mélangés (à air induit) et ceux qui ne sont pas pré-mélangés. Les brûleurs à pré-mélange mélangent une partie de l'air de combustion au combustible avant qu'il ne débouche au nez du brûleur. On obtient une combustion plus rapide grâce à ce pré-mélange, mais ce genre de brûleurs ne peut être employé sur les gaz où la vitesse de propagation de la flamme est très élevée (gaz riche en hydrogène). Dans les brûleurs qui ne sont pas pré-mélangés, l'air de combustion pénètre dans le brûleur en parallèle avec le jet de gaz et se propage lentement dans celui-ci. Ces flammes sont plus longues et plus éclatantes que celles à pré-mélange.

Remarque : les brûleurs à gaz sont utilisés lorsqu'on a la certitude de ne jamais manquer de combustible (gaz naturel). [28]

- **Brûleurs à combustible liquide**

La pulvérisation du combustible liquide (huile) permet de le mélanger avec l'air de combustion. La pulvérisation peut être effectuée de manière mécanique ou en utilisant de la vapeur d'eau. Les brûleurs à vapeur d'eau à pulvérisation sont les plus couramment employés. Il est nécessaire de chauffer légèrement la vapeur utilisée pour éliminer toutes les gouttelettes en suspension. La vapeur présente une pression supérieure de 1 à 1,5 bars à celle du combustible. La quantité de vapeur requise est liée au débit du combustible. [28]

- **Brûleurs mixtes** : ils peuvent être alimentés soit en combustible gazeux, soit en combustible liquide.

## b. Classification selon la circulation d'air

Les brûleurs peuvent être à air induit par tirage naturel ou à air forcé.

- **Brûleurs à air induit par tirage naturel :**

Leurs qualités sont la robustesse, l'exploitation facile, le fonctionnement avec de larges variations de % d'air de combustion sans influence sur le rendement de la combustion, la faible sensibilité aux variations des caractéristiques des combustibles, la technologie simple et le prix de revient intéressant. [27]

- **Brûleurs à air forcé**

La pression de l'air de combustion est appliquée à travers une gaine grâce à des ventilateurs. Les combustibles aux brûleurs présentent des pressions variées en fonction de leur nature et du type de brûleur. La pression recommandée pour les brûleurs à air induit avec des combustibles liquides est de

5 à 6 bars, tandis que pour les brûleurs à air forcé avec des combustibles liquides, elle entre 7 et 20 bars. [27]

Les brûleurs fonctionnent avec des excès d'air très variables.

- **Avec des brûleurs à air induit par tirage naturel** : 25 à 40% d'excès d'air pour les combustibles liquides et 20 à 25 % pour les combustibles gazeux.
- **Avec des brûleurs à air forcé** : 10 à 15% avec tous les combustibles. [28]

#### I.3.4.8 Surveillance des brûleurs

Il est essentiel de surveiller visuellement les brûleurs afin de repérer ceux qui ne fonctionnent pas correctement. La forme et la teinte de la flamme fournissent des informations précieuses. Les flammes rouges et fumeuses instables nécessiteront une modification de l'admission, une vérification de la pression et de la température du combustible. [28]

#### I.3.4.9 Cheminée

La cheminée, de forme cylindrique, peut être placée sur le four ou sur une fondation distincte. La cheminée a pour fonction de :

- Transporter les fumées dans l'air à une hauteur qui ne gêne pas les voisins ;
- Donner, par son tirage, une dépression à la chambre de combustion en permettant l'entrée de l'air nécessaire à la combustion par les volets d'air des brûleurs. Il est donc nécessaire de calculer ses dimensions, sa hauteur et son diamètre afin d'obtenir ce tirage. [29]

#### I.3.4.10. Préchauffeurs d'air

Le préchauffeur d'air est un échangeur de chaleur qui permet la récupération de la chaleur perdue par les fumées à la sortie de la zone de convection d'un four avant d'être évacuées vers l'atmosphère par la cheminée, en préchauffant l'air de combustion. Il permet ainsi l'amélioration significative du rendement thermique du four (environ 10 %) par la réduction de la consommation du gaz combustible et par conséquent la diminution de la pollution de l'environnement par la réduction des gaz brûlés évacués vers l'atmosphère. [30]

#### a. Différents types de préchauffeurs d'air

- **Préchauffeur d'air intégré**

C'est un échangeur constitué de tubes en acier, placé en zone de convection du four et dont la constitution est identique à celle des zones de convection classiques de réchauffage de fluide de procédés. La surface d'échange du côté fumées peut être accrue par des ailettes ou des aiguilles. [31]

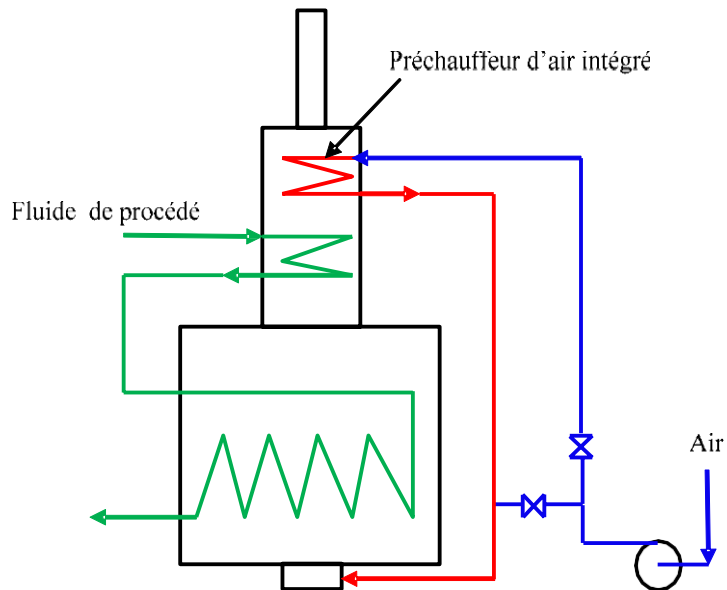


Figure II. 13 : Préchauffeur d'air intégré [31]

- **Préchauffeur d'air dynamique ou rotatif** : le plus fréquemment utilisé, est constitué par un rotor recevant un empilage de tôles minces gaufrées (appelées aussi lamelles). Un moteur assure la rotation du rotor (1 à 2 tours par minute). Les tôles du rotor passent successivement dans le courant de fumées, où elles s'échauffent, et le courant d'air de combustion, qui s'échauffe à leur contact. Des joints métalliques d'étanchéité montés sur le rotor assurent une étanchéité imparfaite avec le stator et entre les circuits air et fumées. [32]

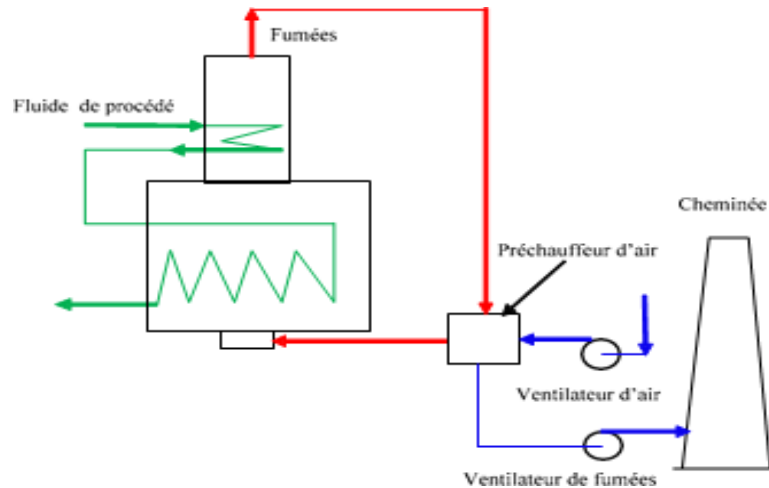


Figure II. 14 : Préchauffeur d'air séparé [32]

#### I.3.4.11 Combustion dans un four

La combustion se produit lorsqu'un carburant est réagi chimiquement avec un comburant. Cette réaction a lieu à une vitesse élevée et entraîne une libération de chaleur, ce qui en fait une réaction exothermique.

Les émissions de gaz ou de liquides utilisées dans les fours de raffinerie proviennent habituellement des opérations de raffinage. Souvent, ces combustibles renferment des impuretés, notamment du soufre, dont la quantité peut varier en fonction de l'origine du combustible. [33]

##### a. Réactions de combustion

Dans les réactions de combustion, on distingue les réactifs appelés combustibles ou carburants (carbone, soufre, hydrocarbures) qui subissent la réaction et l'agent de combustion appelé comburant (l'oxygène ou généralement l'air). Les produits de la combustion comprennent le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), l'eau, l'azote et éventuellement l'oxyde de carbone ou l'oxygène. L'eau peut, selon la température de sortie des fumées, être liquide ou vapeur. Dans la plupart des cas, le comburant utilisé est l'air plutôt que l'oxygène pur. La composition de l'air est approximativement 21% d'oxygène et 79% d'azote (gaz inerte) en %molaire. Connaissant la composition du gaz combustible, ces réactions permettent de déterminer la quantité d'oxygène et par conséquent la quantité d'air nécessaire à la combustion complète, ainsi que la chaleur libérée par la combustion. [34]

De nature très variée, les combustibles peuvent se trouver sous forme :

- De gaz : hydrogène, hydrocarbures gazeux, H<sub>2</sub>S,
- De gaz liquéfiés : propane, butane,
- D'hydrocarbures liquides.

La combustion ne peut se produire qu'aux conditions suivantes :

- Le combustible, d'une façon générale, se trouve en phase gazeuse,
- Le combustible et le comburant doivent être dans des proportions convenables,
- Le combustible et le comburant doivent être intimement mélangés. [34]

### **b. Qualité de la combustion**

La maîtrise de la combustion est primordiale, le rendement thermique et surtout les risques d'explosion en dépendent beaucoup. La combustion peut être théorique, incomplète ou avec excès d'air.

-Combustion neutre : appelée combustion théorique, elle est réalisée sans présence d'oxyde de carbone et d'HC imbrûlés dans les fumées. La quantité d'air nécessaire à la combustion complète est appelée air théorique.

-Combustion complète : en pratique, pour assurer la combustion complète, on utilise une quantité d'air supplémentaire à celle théorique appelée excès d'air exprimé en % de la quantité d'air théorique. On estime que l'excès d'air est de 20 à 30 % pour les combustibles gazeux et 30 à 40 % pour les combustibles liquides. Cet excès d'air dépend, de la température de l'air de combustion et principalement du combustible.

-Combustion incomplète : lorsque l'air fourni à la combustion est inférieur à l'air théorique, la combustion est dite incomplète. Si le manque d'air est faible, on observe la formation de monoxyde de carbone. Pour des manques d'air plus importants, il peut subsister des hydrocarbures imbrûlés ou du carbone sous forme de graphite (noir de fumée). [35]

### **c. Chaleur de combustion**

C'est le nombre de calories dégagées par la combustion d'une mole de combustible à des conditions opératoires bien définies (P = 760 mm Hg, combustible et O<sub>2</sub> pris à 0°C, eau totalement condensée). [35]

#### **I.3.4.12. Rendement d'un four**

Le rendement thermique d'un four est défini comme le rapport entre la quantité de chaleur absorbée par le fluide réchauffé et celle dégagée par la combustion. On constate en effet des pertes thermiques qui ont essentiellement deux origines :

- Les pertes par les parois du four ( $Q_{\text{parois}}$ ) : dues aux imperfections de l'isolation thermique par les matériaux réfractaires. Dans le cas des fours récents de grande puissance thermique elles représentent 1 à 2 % de chaleur libérée aux brûleurs ( $Q_{\text{entrée}}$ ). Elles peuvent être beaucoup plus importantes dans le cas de fours anciens dont le réfractaire est défectueux.
- Les pertes par les fumées ( $Q_{\text{fumées}}$ ) : 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.

Le bilan thermique d'un four est :  $Q_{\text{entrée}} = Q_{\text{absorbée}} + Q_{\text{fumées}} + Q_{\text{parois}}$

Ainsi, le rendement d'un four «  $\eta$  (%) », Peut être défini comme le rapport du débit de chaleur absorbé par le fluide de procédé au débit de chaleur fourni au four par la combustion. [24]

#### **I.3.4.13. Fours de la raffinerie RA2K**

Les trois fours F-101, F-102 et F-103 de la raffinerie RA2K de Skikda se distinguent par leur conception avec un préchauffeur d'air commun et une cheminée commune, ce qui permet à chaque four de fonctionner seul avec le préchauffeur d'air en service.

Les fumées sont mélangées et refroidies dans le préchauffeur d'air à la sortie de la zone de convection de chaque four, puis évacuées par la cheminée vers l'atmosphère par deux ventilateurs extracteurs (les deux doivent être en fonctionnement). Deux autres ventilateurs refoulent l'air de combustion dans le préchauffeur d'air avant de l'envoyer aux brûleurs. Il est essentiel d'avoir toujours un ventilateur en marche car les trois fours sont spécialement conçus pour un tirage forcé.

La chambre de combustion est surveillée par des instruments de mesure, de contrôle et de sécurité intégrés aux fours (gaz combustible, air de combustion, flamme, température de la chambre de combustion, températures de peau des tubes, etc.). Si les conditions de fonctionnement ne respectent pas les normes d'exploitation, les fours peuvent être arrêtés par des systèmes de sécurité adaptés pour prévenir les risques d'incidents. [23]

Le schéma ci-dessous représente le fonctionnement des trois fours avec l'APH

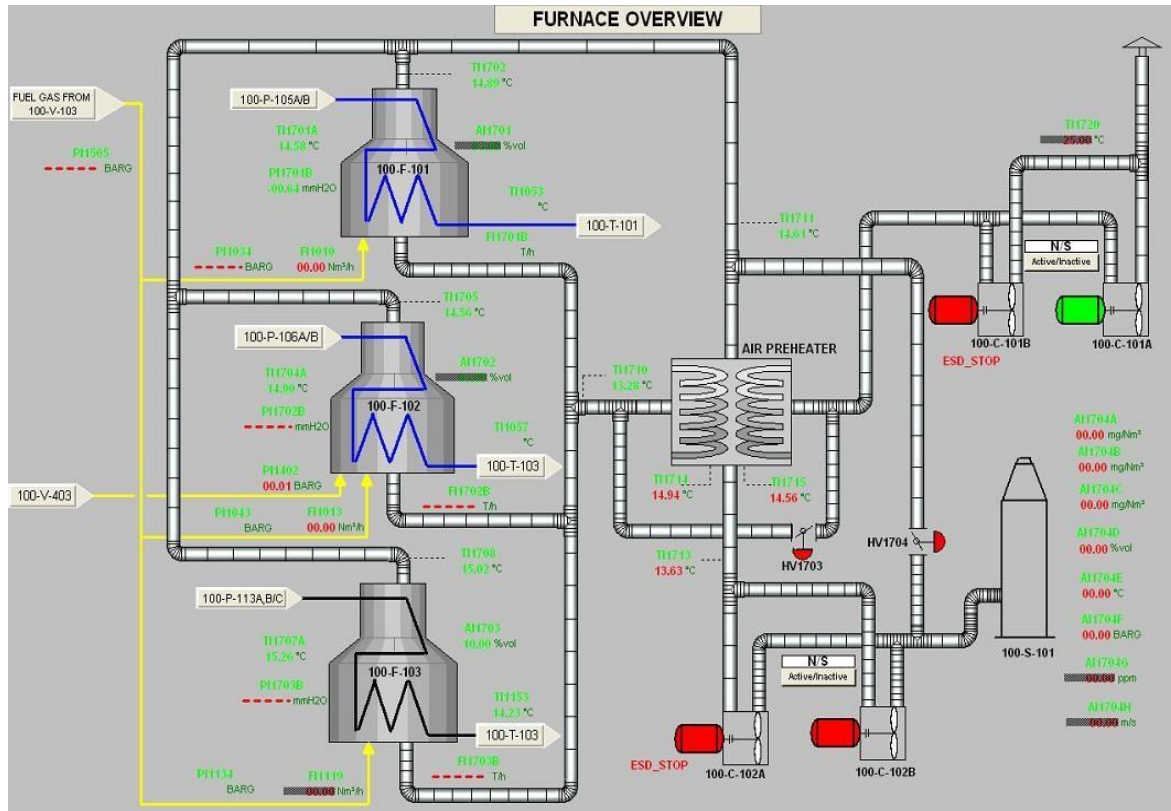


Figure II. 15 : Vue du circuit process des fours de la raffinerie RA2K [1]

**a. Répartition de la charge de chaque four dans les passes**

Le débit du fluide de procédé dans un four est généralement assez important ; il en résulte que le faisceau tubulaire doit offrir une grande surface d'échange pour permettre la transmission d'un débit de chaleur élevé et simultanément une grande section de passage pour limiter les pertes de charge ; Ces deux contraintes conduisent à organiser la circulation du fluide en plusieurs courants parallèles traversant chacun le four dans un circuit distinct, Ces différents circuits sont appelés passes, les passes diffèrent du nombre d'un four à un autre, hors ils sont réalisées de manière symétrique (longueur de tuyauteries, nombre de coudes, etc....), le nombre de passes dans les fours F-101, F-102 et F-103 est respectivement 6, 4 et 8. [23]

**b. Constituants des fours de topping condensat**

- **Zone de radiation**

Appelée aussi chambre de combustion ou de flammes, cette zone est d'une géométrie cylindrique et dispose d'un serpentin de tubes lisses (nues) vertical.

La zone de radiation est garnie de matière réfractaire composée de fibre céramique et la sole est recouverte d'une couche en béton réfractaire. [23]



Figure II. 16 : Disposition des tubes dans la zone de radiation [22]

- **Zone de convection**

Située au-dessus de la zone de rayonnement, cette zone est d'une géométrie parallélépipédique et dispose d'un serpentin de tubes horizontal dont une partie sont lisse et l'autre partie sont ailettes, l'isolation de cette zone se fait par une matière en fibre céramique et cette dernière est recouverte d'une couche en béton réfractaire. [23]



**Figure II. 18 :** Partie inférieure de la zone de convection avec des tubes lisses [22]



**Figure II. 17 :** Partie supérieure de la zone de convection avec des tubes ailettés [22]

**Chapitre III :**  
**Généralités sur l'usure**

### III.1 introduction

Le frottement d'un matériau est un processus complexe, étroitement lié aux facteurs mécaniques, thermiques et physico-chimiques. Le frottement est avant tout un problème d'interface, car mis à part quelques cas spéciaux, le frottement dépendra beaucoup plus des propriétés des couches superficielles que des propriétés volumiques du corps considéré. L'aspect tribologique dans la mise en forme revêt une importance particulière. Dans le cas de la mise en forme à chaud, l'usure est en général la conséquence d'une part, du glissement relatif entre le matériau et l'outil, et d'autre part, du rôle joué par les oxydes. Un certain nombre d'auteurs ont porté leur attention sur ce phénomène et montré que ces systèmes sont complexes dans la mesure où les surfaces en contact évoluent continuellement en fonction du temps. De plus, il y a des effets thermiques dans la mesure où une dissipation d'énergie thermique va intervenir certains phénomènes élémentaires comme notamment l'oxydation, sont activés thermiquement. [13]

### III.2 Les frottements

Les frottements sont omniprésents dans notre vie. Parfois nuisibles quand ils sont trop importants, il est néanmoins difficile d'imaginer un monde dont ils seraient absents : un système mécanique où les différentes pièces n'interagiraient pas les unes avec les autres ne pourrait fonctionner. L'étude de ces frottements, de l'usure qui en découle, de la lubrification est le but de la tribologie, science relativement neuve mais dont l'importance est aujourd'hui indéniable.

Le frottement entre deux éléments dépend :

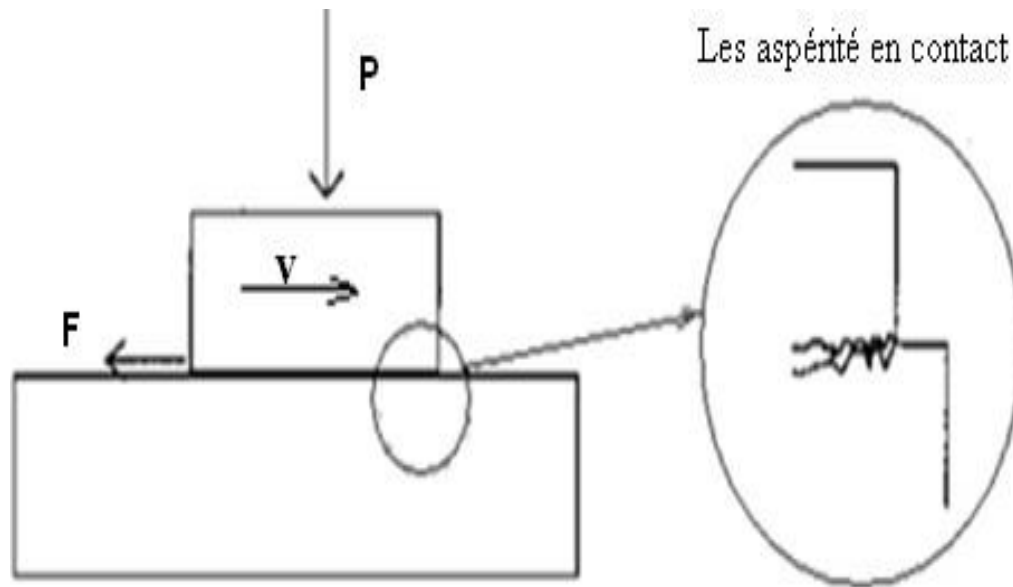
- De la nature des matériaux (acier / glace, gomme / bois, plastique / béton ...)
- De l'état des surfaces en contact (surface lisse ou rugueuse)
- De la présence ou non de lubrifiant sur les surfaces en contact (eau, huile, graisse...). [36]

#### III.2.1 Les différents types de frottement

On peut observer 4 types de frottement :

##### a. Le frottement sec

Le contact entre les deux surfaces est direct. Le glissement est difficile, il y a échauffement et l'usure est rapide. [36]

Figure III. 1 : frottement sec <sup>(36)</sup>**b. Le frottement onctueux**

Un film de lubrifiant recouvre les surfaces en contact sous la forme d'une couche très fine appelé « épilamen ». Les contacts locaux directs sont plus rares et il y a moins d'échauffement. Le frottement est diminué. [36]

**c. Le frottement hydrodynamique**

Il n'y a plus aucun contact entre les surfaces. Celles-ci sont toujours séparées par une couche de lubrifiant.

Le frottement est très réduit et l'usure pratiquement nulle. ( $F = 0,002$  à  $0,01$ ). [36]

**d. Le frottement mixte**

C'est un mélange de frottement onctueux et frottement hydrodynamique. ( $F = 0,04$  à  $0,1$ ). [36]

**III.3 Etats de surface**

Une surface réelle usinée n'est jamais parfaite, elle présente toujours des défauts par suite des erreurs systématiques d'imperfections, admissibles dans la fabrication.

Les défauts peuvent être de forme (défauts macro-géométriques, ondulations) ou de petits défauts (défauts micro-géométriques) désignés plus communément sous le nom de rugosité.

Ces deux types de défauts peuvent être distingués de la manière suivante, en considérant la Figure III.2 Relatif à l'état de surface. [36]

Où :

- L : Longueur ;
- H : hauteur d'onde ;
- h : hauteur de rugosité.

Si  $L/H = 50$  à  $1000$  on a une ondulation ; Si  $L/H < 50$ , on a une rugosité.

Donc la rugosité ou l'état de surface est caractérisée par des défauts de surfaces de faibles amplitudes.

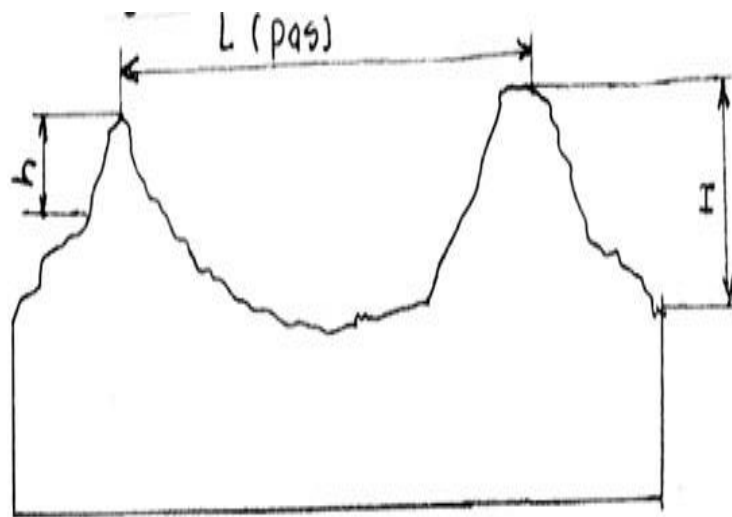


Figure III. 2 : Défauts relatifs à l'état de surface [37]

#### III.4 Défauts de rugosité

Les défauts de rugosité possèdent une grande influence sur les fonctions des surfaces. L'état de rugosité dépend en effet des caractéristiques très diverses telles que : le frottement, la résistance au matage, l'étanchéité, la résistance à l'écoulement des fluides ... etc.

Une coupe longitudinale ou transversale d'une surface réelle donne un profil sur lequel on relève des défauts de plusieurs ordres de grandeur (Figure III.3). [37]



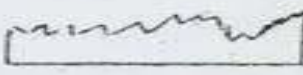

N° d'ordre	Désignation	Illustration
1	Ecart de forme	
2	Ondulation	
3	Stries Sillon	
4	Arrachement, Marque d'outil Fente Piqûre	

Figure III. 3 : différents ordres de grandeur des défauts de rugosité [37]

### III.5 Facteurs de l'usure

**III.5.1 Mode de contact :** Le mode de contact géométrique influe sur le rôle que les différentes pièces jouent tout au long de la durée d'utilisation du mécanisme ; on peut distinguer :

- Les contacts ponctuels (exemple : contact entre deux sphère) ;
- Les contacts linéaires (exemple : contact entre deux cylindre) ;
- Les contacts surfaciques (exemple : plan sur plan). [38]

### III.5.2 Vitesse relative entre les pièces :

Il s'agit, suivant le cas, des vitesses de glissement, de roulement ou de pivotement. Dans le cas du glissement à sec (non lubrifié), elle influe surtout sur la température superficielle des pièces en contact, et dans le cas du glissement lubrifié, elle est un facteur important d'établissement du régime hydrodynamique.

### III.5.3 Ambiance :

Par ambiance on entend la nature du milieu (présence de lubrifiant ou non, milieu corrosif : usure corrosive, etc.) ainsi que les conditions de pression et de température qui entourent les pièces dans la région du contact.

### III.5.4 Nature des matériaux :

Il s'agit de la composition chimique, de la structure métallurgique et des propriétés mécaniques des matériaux en contact, et plus particulièrement des couches superficielles. [38]

### III.6 Les effets observables de l'usure

#### III.6.1 La résistance au déplacement :

Peut être traduite en coefficient de frottement, l'évolution de ce coefficient en fonction du temps appartient en général aux trois types suivants :

- Le coefficient garde une valeur constante ; les dégradations superficielles sont faibles ;
- Le coefficient évolue de façon aléatoire. Dans ce cas, les dégradations par usure sont importantes ;
- Le coefficient varie de manière périodique, c'est le phénomène de glissement saccadé ;

#### III.6.2 Phénomènes thermiques :

La chaleur engendrée par le frottement dans la zone de contact provoque un accroissement important de la température dans cette zone. Cet accroissement brutal provient du fait que toute l'énergie dégagée se fait dans un volume de faible capacité calorifique. [39]

#### III.6.3 Transformations géométriques :

Sous l'effet de la charge et du frottement, les aspérités des surfaces des matériaux en contact sont le siège de déformations élastiques ou plastiques. L'état de surface micro géométrique évolue donc au cours du frottement. Les aspérités peuvent être écrasées ou arrachées. Dans certaines circonstances, il y a apparition de rayures ou de fissures. [39]

#### III.6.4 Transformations mécaniques et chimiques :

Les contraintes et les cycles thermiques ont pour effet de transformer la structure et donc les propriétés mécaniques des matériaux en contact et plus particulièrement les couches superficielles. Les changements rapides de température et de contrainte peuvent être à l'origine d'apparition de phases qu'il n'est pas possible d'obtenir par d'autres procédés. [39]

#### III.6.5 Variation de masse :

La perte de masse au cours de l'usure a été déjà évoquée. Cette perte peut être déterminée à partir des méthodes suivantes :

- Mesures pondérales, par la pesée des pièces à des instants choisis à l'avance ;
- Mesures dimensionnelles des pièces au cours de leur utilisation ;
- Mesures de la teneur en résidus d'usure des lubrifiants à l'aide d'un spectromètre de masse. Cette méthode permet le suivi de l'usure des moteurs et des circuits hydrauliques ;
- Mesures de la rugosité à l'aide d'un rugosimètre. [39]

### III.7 Les principaux modes d'usure

Les surfaces de frottement des mécanismes en général et des moteurs en particulier peuvent être affectées par différentes formes tribologiques d'usure dont les principales sont :

L'usure adhésive ; L'usure abrasive ; L'usure corrosive ; L'usure par fatigue de contact. [40]

#### III.7.1 Usure adhésive

L'usure adhésive est le type d'usure le plus fondamental, elle est due au cisaillement par frottement des micro-soudures ou jonctions qui se forment entre deux aspérités en contact direct métal-métal. [40]

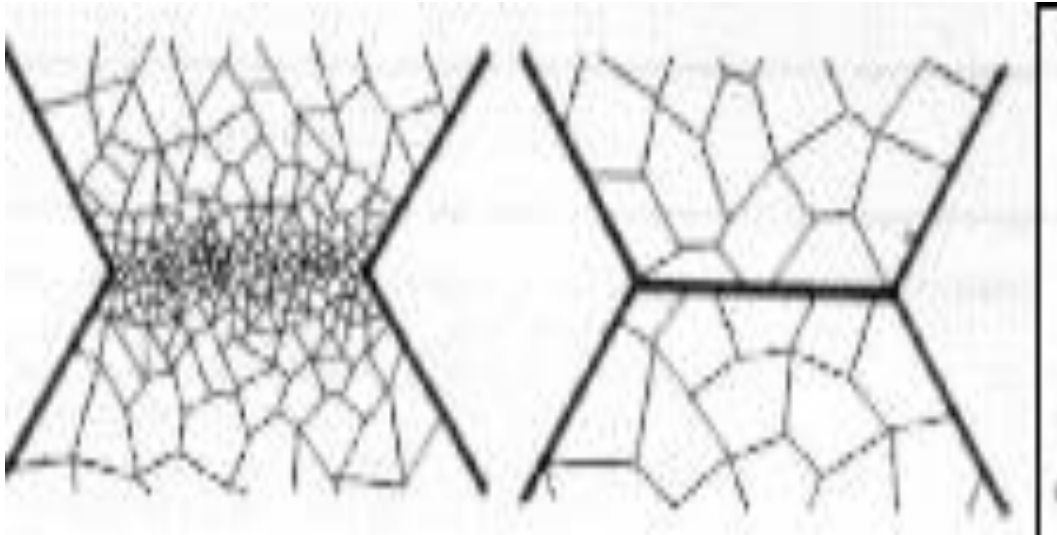


Figure 25 : types de jonction entre deux aspérités [40]

##### III.7.1.1 Prévention de l'usure adhésive

Au niveau de la conception technologique et géométrique des surfaces de contact, il est possible de prévenir l'usure adhésive en diminuant les échauffements inter-faciaux dus au frottement :

- En limitant la distribution des pressions et la vitesse de glissement ;
- En assurant un refroidissement convenable des surfaces par un choix de matériau thermo-conducteur et par l'emploi d'un fluide réfrigérant.

Au niveau du choix des matériaux des surfaces en frottement :

- En utilisant des couples de matériaux ayant des faibles interactions ;

Interposer un film autolubrifiant à faible résistance au cisaillement. [40]

### III.7.2 Usure abrasive

L'usure abrasive est définie comme l'usure par déplacement de matière, produite par des particules dures.

Les particules abrasives peuvent avoir deux origines : soit elles proviennent des débris d'usure adhésive, ces débris peuvent s'oxyder et devenir très durs ; soit elles sont produites par des salissures (par exemple du sable ayant pénétré dans le système).

Le polissage est une forme d'usure abrasive dans laquelle des particules dures et de forme anguleuse sont introduites intentionnellement pour permettre d'améliorer l'état de surface d'un matériau par abrasion. La dégradation de la surface par usure abrasive se manifeste par des polissages, des griffures ou des arrachements de copeaux, d'écaillés ou de fins débris. [40]

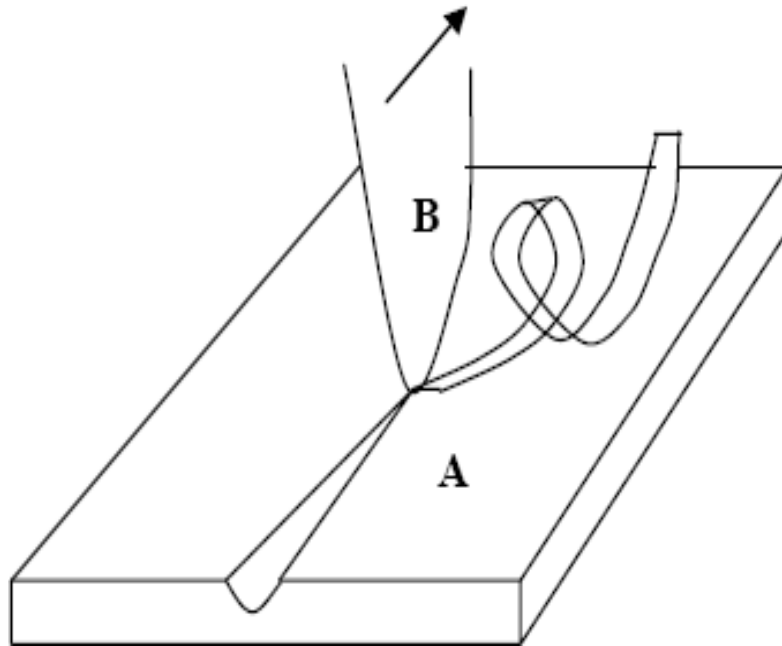


Figure III. 4 : Production de l'usure abrasive [40]

#### III.7.2.1 Prévention de l'usure abrasive

En premier lieu, il convient d'empêcher les particules abrasives d'arriver jusqu'aux surfaces de frottement ;

Lorsque l'abrasion est à deux corps, il est possible de jouer sur l'état de surface par des usinages appropriés qui arasent les aspérités aigues ;

- Par le choix des matériaux, l'augmentation de la dureté et de la cohésion du matériau dans le sens de l'amélioration de la résistance à la corrosion ;

La résistance à l'abrasion peut aussi être obtenue par un revêtement superficiel dur :

- Traitement de surfaces : cémentation, carbonituration, nitruration, trempe superficielle ;
- Revêtement de métaux et alliages durs obtenus soit par dépôt électrolytique (chrome dur) soit par projection au chalumeau à combustion ou à plasma (le dépôt au chalumeau s'effectue à partir de fil de métaux ou d'alliages tant que le matériau déposé par plasma est mis en œuvre sous forme de poudres [40])

### **III.7.3 L'usure corrosive**

La corrosion est une dégradation d'un matériau métallique sous l'action d'agents chimiques. L'exemple le plus classique de ce type de dégradation est la rouille qui apparaît dans les aciers ordinaires en atmosphère humide quand aucune action de protection n'a été entreprise. [41]

#### **III.7.3.1 Protection et lutte contre la corrosion des métaux**

Les actions de protection contre la corrosion sont de trois types :

- Action sur le matériau métallique : forme adaptée des pièces et des structures, revêtements, emploi d'alliages passifs ;
- Action sur l'agent corrosif : addition d'inhibiteur de corrosion ;
- Action sur le processus de corrosion : protection électrochimique. [41]

### **III. 8 L'usure dans les tubes des fours de la raffinerie RA2K**

Les inspections et suivies durant l'arrêt programmé de l'année 2016, ont montrées que la perte en matière des tubes au niveau des supports guides intermédiaires continue d'évoluer. Les relevées d'épaisseur prises par ultrason ont donné des profondeurs de l'ordre de 1,5 mm à 2mm, aux endroits dont l'usure est plus avancée. Les enregistrements de l'arrêt qui précède, donnent des valeurs de 1 mm de profondeur, ce qui veut dire que l'arrachement du métal continue d'une manière progressive et régulière, le suivi du phénomène doit prendre, dans ce cas, plus d'attention, en plus, une étude du problème et des solutions radicales doivent être prises en compte, ainsi qu'une intervention rapide avec des recommandations immédiates.

**III.9. Conclusion**

La tribologie est une science vaste et de grandes variétés et les résultats du phénomène tribologique peuvent être destructifs et coûteuses. Les inspections au niveau des équipements pouvant présenter un tel problème doivent être intensives et continues, et le suivi du problème est indispensable.

**Chapitre IV :**  
**Calculs et recommandations**

### IV.1 Introduction

L'usure constatée au niveau des tubes dans les fours de la raffinerie RA2K est un problème d'une extrême importance, et l'intervention au plus vite est d'une nécessité incessante. Surtout qu'ils soient dans une zone de degré de danger élevée.

La constatation donnée admet une perte en matière aux endroits indiqués par le travail du frottement entre les tubes et les supports intermédiaires, qui ont laissé les marques d'enlèvement du métal par un outil tranchant. En première idée ça remonte au phénomène tribologique, c'est un phénomène courant dans les implantations industrielles ; mais on peut considérer que c'est un défaut de construction, car l'origine du problème est méconnue et qu'il réside probablement depuis la conception.

Que ce soit un phénomène tribologique ou bien un défaut de construction, on doit vérifier que l'épaisseur des tubes est tolérable, et à quel moment l'intervention doit avoir lieu. Pour faire ainsi, l'API 530 donne le standard design des tubes des fours dans les raffineries.

### IV.2 Les dégâts que l'usure des tubes peut engendrée

La rupture d'un tube en tant que le four est en service est une catastrophe, des dégâts matériels et économiques sont en jeu et les pertes peuvent atteindre l'humain. Les accidents dans ce contexte sont rares c'est vrai, mais le danger est imprévisible, un exemple d'incident causé par la défaillance des tubes d'un four est le cas de la raffinerie de "Okinawa, Japon".

### IV.3 Historique de l'usure des tubes

L'usure des tubes au niveau des supports intermédiaires dans les fours est presque généralisée sur l'ensemble des tubes. Les cas les plus sévères sont indiqués aux rapports d'inspection des années 2011, 2013 et 2016 comme suit :

- **En 2011** : les rapports d'inspection ignorent la présence du phénomène à cause du manque de moyens, ce qui est définie dans les rapports N° Ti/100/004/2011, N° Ti/100/005/2011 et N° Ti/100/006/2011

RELEVÉ D'ÉPAISSEURS : le contrôle à l'ultrason des tubes n'est pas effectué par manque des moyens adéquats. [42]

- **En 2013** : les rapports d'inspection indiquent le manifeste de l'usure par friction entre les tubes et les supports intermédiaires du four F-101 citée dans les rapports suivants :

Rapport sur le four F-101 N° Ti/100/003/2013 :

Usures par friction des tubes au niveau des supports intermédiaires localisées au niveau des tubes suivants :

Passe A : tubes N° 10-11 &

14 ; Passe B : tubes N° 11&

13 ; Passe C : tubes N° 05 &

13 ; Passe D : tube N° 13.<sup>(44)</sup>

La profondeur maximale relevée sur les tubes énumérés ci-dessus est de l'ordre de 01 mm

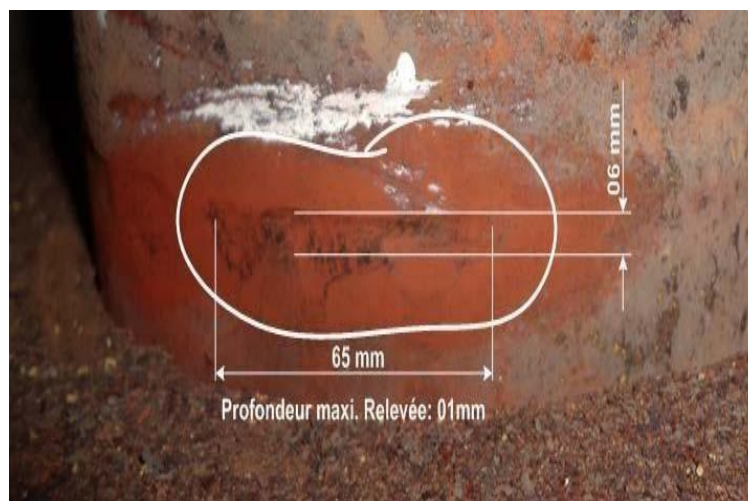


Figure IV. 1 : Usure des tubes par friction, Four 100-F-101 [43]

Rapport sur le four F-102 N° Ti/100/001/2013



Usure par friction entre le support "Guide tube" et le "tube" au niveau de la zone radiante.  
 - Profondeur: 01 mm  
 - Longueur: 50 mm

Figure IV. 2 : Usure des tubes par friction en 2013, Four 100-F-102[43]

L'usure des tubes par friction est jugée "inacceptable" et les recommandations sont décrites comme suit :

"Réparation par recharge a la soudure de l'usure par friction localisée sur le tube n° 05 de la passe E, profondeur (02 mm environ) jugée notable et inacceptable. [43]

- **En 2016** : les rapports de l'organisme de contrôle VINÇOTTE affirment l'existence de l'usure par friction aux mêmes endroits. Les cas les plus sévères sont affichés sur les figures suivantes. [44]

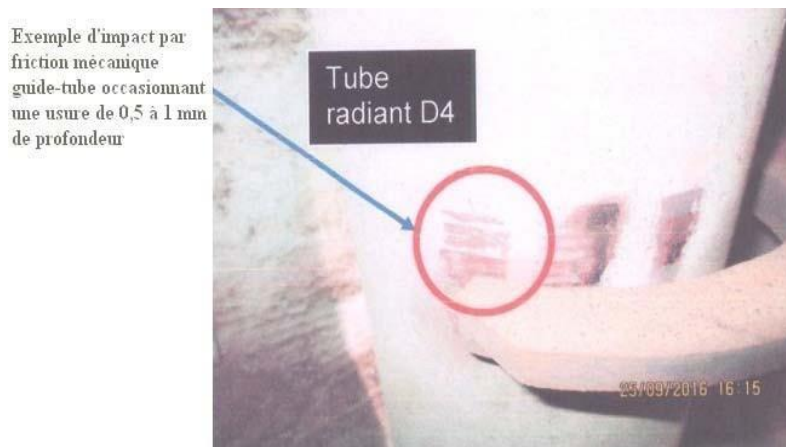


Figure IV. 3 : Usure des tubes par friction en 2016, Four 100-F-101 [44]

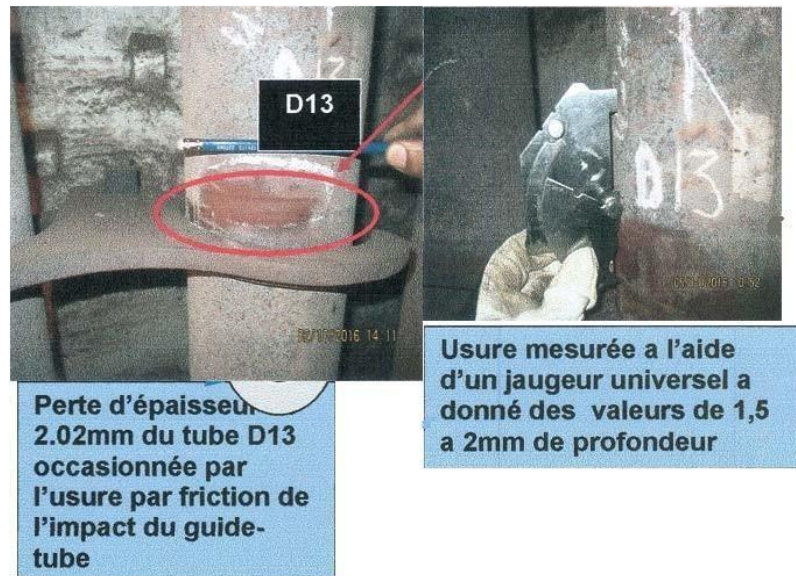


Figure IV. 4 : Usure des tubes par friction en 2016, Four 100-F-102 [44]

Exemple d'impact par friction mécanique guide-tube occasionnant une usure de 0,5 à 1 mm de profondeur



Figure IV. 5 : Usure des tubes par friction en 2016, Four 100-F-103 [44]

#### IV.4 Design des tubes dans un four

Il y a une distinction essentielle entre la réaction de l'acier dans un tube de four à 300 °C et celle de celui à 600 °C. La température maximale de fonctionnement de l'acier entraîne une augmentation ou une déformation permanente, même à des niveaux de contrainte bien inférieurs à la limite d'élasticité. Lorsque la température du métal du tube est assez élevée pour que les effets du fluage soient importants, le tube tombe en panne par rupture par fluage, même si aucun mécanisme de corrosion ou d'oxydation n'est nécessaire. En ce qui concerne l'acier qui fonctionne à des températures basses, les

effets du fluage sont absents ou minimales. Selon l'expérience, dans cette situation, le tube reste inchangé, à moins qu'un mécanisme de corrosion ou d'oxydation ne soit actif. Étant donné qu'il existe une distinction essentielle entre le comportement des matériaux à ces deux températures, il sera nécessaire de prendre en compte deux approches de conception différentes pour les tubes de fours : la conception à la limite élastique (design à la limite de rupture) et la conception à la limite de rupture. [45]

#### IV.5 Conception élastique (Elastic design)

Les calculs de la conception élastique sont effectués dans la gamme élastique, à des températures basses, en se basant sur la limite d'élasticité. Ce design vise à éviter la rupture lorsque la pression atteint un niveau de service maximal, sans prendre en compte la surépaisseur de corrosion. [45]

#### IV.6 Conception à la limite de rupture (Rupture design)

Les calculs sont basés sur la limite de cisaillement pour déterminer la conception à la limite de rupture dans la gamme fluage-rupture, à des températures élevées. Le but de ce design est d'éviter la rupture par fluage ou cisaillement lorsque la pression atteint un niveau de service maximal. [45]

#### IV.7 Calcul de l'épaisseur du design

##### IV.7.1 Épaisseur minimum du design $\delta_{\min}$

$$\delta_{\min} = \delta_{\sigma} + f_{\text{corr}} \cdot \delta_{C\text{Æ}} \quad 4.1$$

Où :

$\delta_{\min}$  : Épaisseur minimum requis d'un tube neuf, en tenant compte toutes les admissions appropriées (contraintes, surépaisseurs...);

$f_{corr}$  : Facteur de corrosion, donnée en fonction de B et de n (Figure IV.6) ;

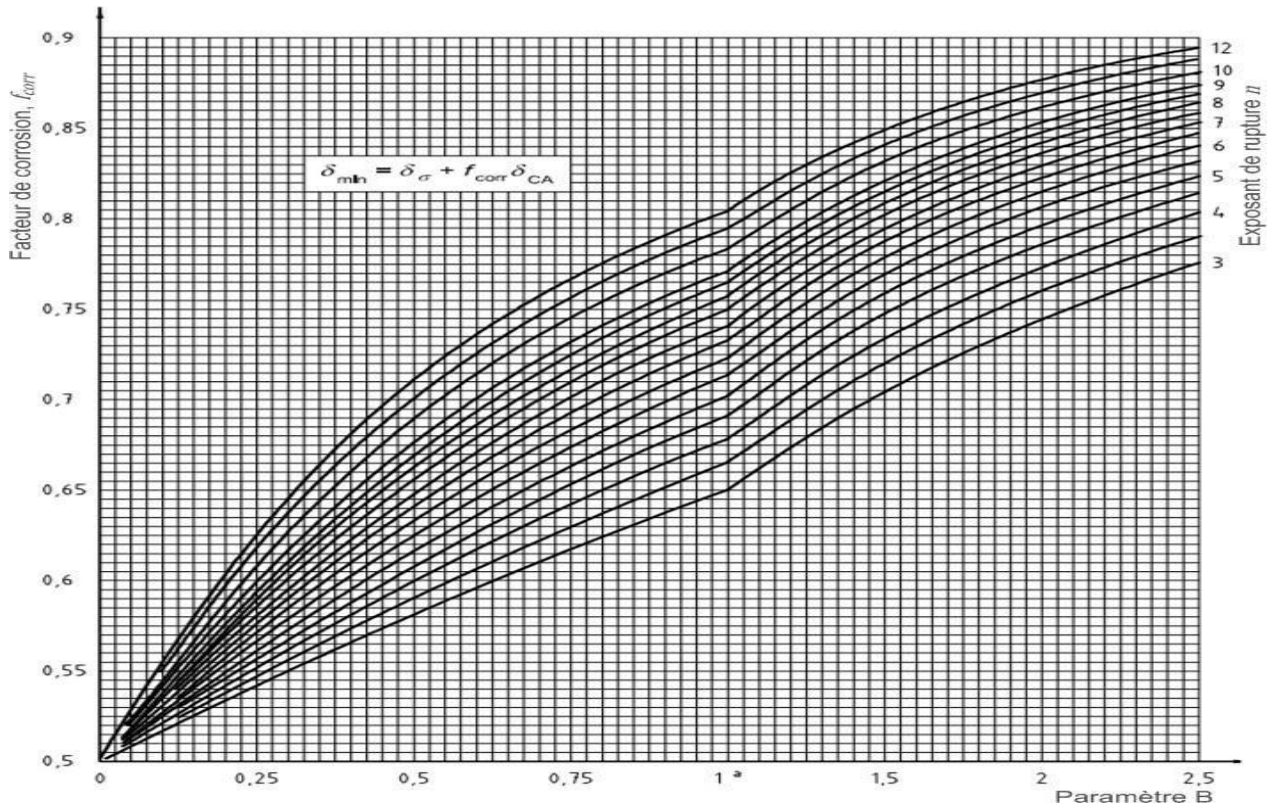


Figure IV. 6 : facteur de corrosion[45]

$\delta_{CA}$  : Surépaisseur de corrosion, ajoutée en admirant la perte du métal durant la durée de vie du composant. Egale à 3,2 dans le cas présent ;

$\delta_{\sigma}$  : Épaisseur calculée des équations 4.2 et 4.3, qui utilise la contrainte admissible et qui,exclus toutes autres admissions.

$$\delta_{\sigma} = P.D_0 \quad \text{Ou : } \delta_{\sigma} = \left| \frac{P.D_i}{4} \right| \quad 4.2$$

Avec :

$D_0$  : Diamètre extérieur du tube neuf ;

$D_i$  : Diamètre intérieur du tube, utilisé dans le calcul du design ;

P : Pression du design ;

$\sigma_{el}$  : La limite élastique du matériau du tube, exprimée en MPa (psi), à la température de design.

Les équations 4.1, 4.2 et 4.3, sont convenables pour les tubes des fours, cependant, si des circonstances spéciales exigent une conception plus conservatrice, un facteur de corrosion  $f_{corr} = 1$  Peut être spécifié. [10]

#### IV.7.2 Vérification de l'épaisseur du design

Données :

$$\delta_{CAE} = 3,2 \text{ mm ;}$$

$$f_{corr} = 1 ;$$

- **Pour le four F-101**

$$D_0 = 168,3 \text{ mm (6" ) ; (Fiche technique annexe A)}$$

$$P = 18,36 \text{ bar} = 1,836 \text{ MPa (261 psi) ; (Fiche technique annexe A)}$$

$$\sigma_{el} = 106,873 \text{ MPa (15,5 kpsi) ; À la température du design } T_{design} = 382^\circ\text{C}$$

- **Pour le four F-102**

$$D_0 = 168,3 \text{ mm (6" ) ; (Fiche technique annexe A)}$$

$$P = 18,36 \text{ bar} = 1,836 \text{ MPa (261 psi) ; (Fiche technique annexe A)}$$

$$\sigma_{el} = 106,183 \text{ MPa (15,4 kpsi) ; À la température du design } T_{design} = 390^\circ\text{C}$$

- **Pour le four F-103**

$$D_0 = 168,3 \text{ mm (6" ) ; (Fiche technique annexe A)}$$

$$P = 15,7 \text{ bar} = 1,57 \text{ MPa (223 psi) ; (Fiche technique annexe A)}$$

$$\sigma_{el} = 79,292 \text{ MPa (11,5 kpsi) ; À la température du design } T_{design} = 492^\circ\text{C}$$

Application numérique

F-101 :  $\delta_{\sigma} = 1,433 \text{ mm}$  ;  $\delta_{\min} = 4,633 \text{ mm}$  ;

F-102:  $\delta_{\sigma} = 1,443 \text{ mm}$  ;  $\delta_{\min} = 4,643 \text{ mm}$  ;

F-103 :  $\delta_{\sigma} = 1,650 \text{ mm}$  ;  $\delta_{\min} = 4,850 \text{ mm}$  ;

## IV.8 Calcul de résistance sous contrainte thermique

### IV.8.1 Calcul de la contrainte initiale

L'équation de la contrainte est donnée dans l'API 530 par l'équation suivante :

$$\sigma_0 = \frac{p}{2} \left[ \left( \frac{D_0}{\delta_a} - 1 \right) - \frac{p}{2} \left( \frac{D_i}{\delta_a} - 1 \right) \right] \quad 4.3$$

Où :

$\sigma_0$  : Contrainte initiale de la pression interne, exprimée en MPa ;

$\delta$  : Épaisseur minimum installé, en mm ;

L'épaisseur minimum étant de 6,22 mm. Dans ce cas le calcul devient :

$$\sigma_0 = \frac{1,836}{2} \left( \frac{168,3}{6,22} - 1 \right) ; \quad \sigma_0 = 23,92 \text{ MPa}$$

### IV.8.2 Calcul de la contrainte thermique maximale

Dans les tubes des fours, la contrainte thermique du plus grand souci est celui développé par la distribution radiale de la température par l'épaisseur. Cette contrainte peut devenir particulièrement significative dans des épais d'acier inoxydable exposé aux densités élevées de flux de la chaleur.

La contrainte thermique maximale est donnée par la relation suivante :

$$\sigma_{T\max} = X \left[ \left( \frac{2y^2}{y^2-1} \right) \ln y - 1 \right] \quad 4.4$$

Avec:

$$X = \left[ \frac{\alpha E}{2(1-\nu)} \right] \left[ \frac{\Delta T}{\ln y} \right] = \left[ \frac{\alpha E}{4(1-\nu)} \right] \left[ \frac{q_0 D_0}{\lambda_s} \right] \quad 4.5$$

Où :

$\alpha$  : Coefficient de dilatation thermique ;

$E$  : Module d'élasticité (module de Young) ;

$\nu$  : Module de poisson ;

$\Delta T$  : Différence de température de peau du tube ;

$y$  : Ratio du diamètre extérieur au diamètre intérieur  $y = \frac{D_0}{D_i}$  ; 4.6

$q_0$  : Flux de chaleur sur la surface du tube ;

$\lambda_s$  : Conductivité thermique du métal.

Les propriétés du matériau,  $\alpha$ ,  $E$ ,  $\nu$ , et  $\lambda_s$  seront évalués à la température de peau moyenne destubes.

L'épaisseur de paroi moyenne sera également employée dans cette équation.

Soit :

$E = 25,5 \text{ Msi} = 1,76 \cdot 10^5 \text{ MPa}$  ; D'après ASME B.31.3 table C-6.

$\alpha = 1,35 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  ; D'après ASME B.31.3 table C-3.

Cas design :

$y = \blacksquare$  Soit :  $y = 1,067$

Pour l'application numérique on aura :

$X = 155,238 \text{ MPa}$  ;

$\sigma_{Tmax} = 14,11 \text{ MPa}$  ;

### IV.8.3 Calcul de la contrainte thermique limite

Il y a deux limites pour l'effort thermique ; tous les deux sont décrits dans le code ASME

Section VIII, Division 2, les paragraphes 4-134 et 5-130.

La contrainte thermique limite  $\sigma_{T,lim1}$  peut être calculée selon l'équation :

$$\sigma_{T,lim1} = 2\sigma_y - y\sigma_0 ; [\text{MPa}] \quad 4.7$$

Où :  $\sigma_y$  est la limite élastique du matériau.

La contrainte thermique limite  $\sigma_{T,lim2}$  peut être calculée selon l'équation :

$$\sigma_{T,lim2} = 4(\sigma_y - \sigma_0) ; [\text{MPa}] \quad 4.8$$

Application numérique :

$$\sigma_{T,lim1} = 453,88 \text{ MPa} ;$$

$$\sigma_{T,lim2} = 864,34 \text{ MPa} ;$$

La conception est bonne tant que la contrainte thermique maximale ne dépasse ces deux limites.

## IV.9 Calcul de résistance des tubes après l'usure

### IV.9.1 Calcul de la contrainte après l'usure des tubes

$$\sigma = \frac{p}{2} \left( \frac{D_0}{\delta_a} - 1 \right) = \frac{p}{2} \left( \frac{D_i}{\delta_a} + 1 \right) ; \quad 4.9$$

Où :

$\sigma$  : Contrainte actuelle de la pression interne, exprimée en MPa ;

$\delta_a$  : Épaisseur actuel, en mm ;

Dans ce calcul on va prendre en considérations le cas le plus sévère, c'est le cas du tube N° 13 de la passe D, du four F-102.

L'épaisseur mesurée étant de 5,11 mm. Dans ce cas le calcul devient :

$$\sigma = \frac{1,836}{2} \left( \frac{168,3}{5,11} - 1 \right) ; \sigma = 29,32 \text{ MPa} .$$

Cette contrainte est supérieure à la contrainte initiale, mais toujours inférieure à la contrainte limite.

### IV.9.2 Calcul de la contrainte thermique limite

$$\sigma_{T,lim1} = 2\sigma_y - y\sigma_0 ; [\text{MPa}] \quad \sigma_{T,lim1} = 448 \text{ MPa} ; \sigma_y \text{ d'après ASTMA 106b}$$

$$\sigma_{T,lim2} = 4(\sigma_y - \sigma_0) ; [\text{MPa}]$$

$$\sigma_{T,lim2} = 842,73 \text{ MPa} ;$$

La conception reste toujours bonne tant que la contrainte n'a pas dépassé ces deux limites. Quoique, si le phénomène d'usure continue sans agir le plus vite possible, un dégât matériel sera prévisible au bien tôt. En vue de prévenir le dégât, nous devons faire un bilan du taux d'usure, et de calculer la durée de vie avant rupture (remaining life) pour les tubes.

#### IV.10 Prévention de la rupture des tubes

##### IV.10.1 Calcul de la durée de vie restante (remaining life time)

C'est le temps avant d'atteindre l'état critique (période de vieillissement rapide) du composant, cette durée est basée sur la durée de vie estimée par le constructeur, et n'est pas forcément la durée avant la retraite, ou la durée de vie avant substitution. En outre, la durée de vie restante représente le temps estimé pour intervenir au composant avant d'entrer dans un stade critique qui peut engendrer des dégâts majeurs.

La durée de vie restante est calculée par la formule suivante :

$$t_r = \frac{\delta a - \delta_{min}}{\tau} ; [\text{an}] \quad (15) \quad 4.10$$

Avec :

$t_r$  : Temps restant estimé avant la défaillance du composant, exprimé en années (ou Heurs) ;

$\tau$  : Taux d'usure (épaisseur perdue durant une période du temps), exprimé en mm/an ;

$$|\tau = \frac{\delta_i - \delta_a}{t} ; [\text{mm/an}] \quad 4.11$$

Où :

$t$  : Période de service, exprimée en années ;

$\delta_i$  : Épaisseur initial, en millimètres.

Le tableau suivant conclure le calcul de la durée de vie restante, ainsi que le temps de service perdu à cause de l'usure du tube N°13 de la passe : D, du four 100-F-102.

#### IV.10.2 Calcul estimatif du temps après l'échec

Tableau 4.1 : Estimations de la durée de vie avant l'échec

Durée de vie design	100000 heurs	11,42 ans
Conversion (an/JR)	1 an	365 jours
Conversion (an/HR)	1 an	8760 heurs
Temps de service	8 ans	70080 heurs
Epaisseur initial	7,11 mm	...
Epaisseur actuel	5,11 mm	...
Epaisseur minimum	4,64 mm	...
Taux d'usure	0,25 mm/an	...
Temps avant rupture	1,88 an	16468,8 heurs
durée perdue par l'usure	1,54 an	13451,2 heurs
Temps normalement restant	29920 heurs	3,42 ans

#### IV.11 Solution pratique pour la réparation des tubes

##### IV.11.1 Manchons de renforcement en acier à encerclement complet du tube

Cet article s'applique à la conception et à l'installation de manchons en acier soudés à l'encerclement complet pour la tuyauterie ou les pipelines.

Les manchons peuvent être conçus pour des armatures sans pression ou pour des armatures sous pression. Les manchons de renfort à encerclement complet se sont révélés efficaces dans la réparation d'une grande variété de défauts internes et externes.

Les manchons à encerclement complet en acier, consistent en une enveloppe cylindrique placée autour de la section du tube à réparer et soudée le long des deux joints longitudinaux, comme illustré aux Figures IV.7 et IV.8. Il existe deux types de manchons, appelés ici "Type A" et "Type B". Les manchons peuvent être fabriqués à partir de tuyaux ou d'une plaque laminée.

**a. Manchon de type A**

Les extrémités de ce type ne sont pas soudées circonférentiellement au tube porteur, comme le montre la figure IV.7. Le manchon de type A ne peut pas contenir de pression interne, mais sert de renforcement pour une zone défectueuse. Il est uniquement utilisé pour la réparation des défauts qui ne fuient pas et qui ne devraient pas se développer pendant le service, ou lorsque le mécanisme d'endommagement et le taux de croissance sont entièrement compris.

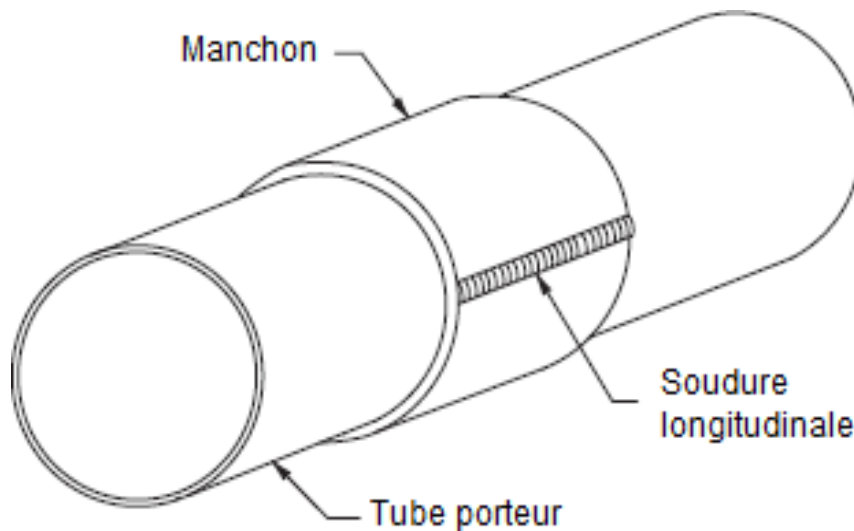


Figure IV. 7 : Manchon de renforcement du Type A

**b. Manchon de type B**

Les extrémités de ce type sont soudées sur la circonférence du tube, comme le montre la figure IV.8. Un manchon de type B peut contenir une pression interne.

Les manchons de type B peuvent être utilisés pour réparer les défauts de fuite ou les défauts qui pourraient éventuellement fuir et pour renforcer les tuyaux présentant des défauts qui réduisent la capacité de charge axiale du tube.

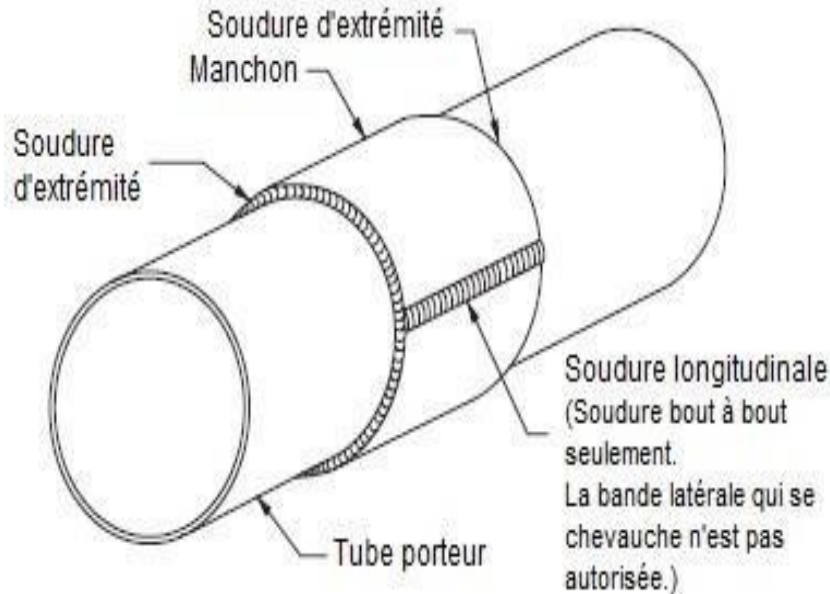


Figure IV. 8 : Manchon de renforcement du Type B

#### IV.11.2 Plaque insérée et soudée bout-à-bout

Cette méthode de réparation implique le remplacement d'une partie de matière du composant avec une plaque, soudée bout à bout. Cette réparation est applicable sur des éléments cylindriques, sphériques ou bien, coniques, travaillant sous pression. La taille de l'élément sous pression n'est pas une limite pour cette procédure, sauf lorsque des considérations pratiques empêchent l'utilisation d'une plaque insérée, comme sur un tube de petit diamètre. Il peut être utilisé sur des composants de pression de petit diamètre si un soin particulier est apporté pour assurer un ajustement serré de la plaque insérée et le composant de pression existant et que le composant de pression réparé répond à la tolérance exigence du code de construction applicable.

- **Remplacement d'une zone localisée dans une calandre ou un tube :**  
Cette méthode de réparation est destinée à être utilisée pour remplacer des parties de parois décuves ou de tubes sous pression qui ont été endommagés par des fissures, l'amincissement de parois locales due à l'érosion, la corrosion et d'autres mécanismes d'endommagement

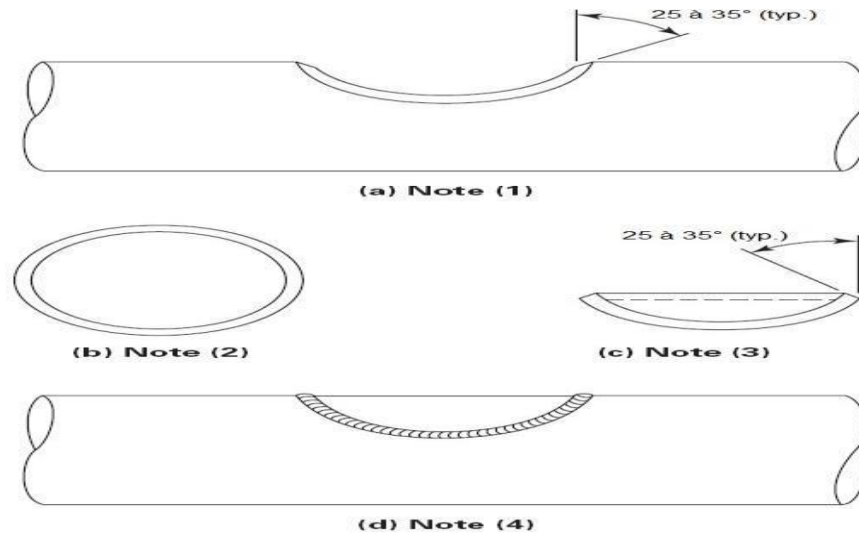


Figure IV. 9 : Type d'insertion d'une plaque soudée dans un tube

Notes:

- (1) Vue latérale de la découpe dans un tuyau ou un tube avec chanfreins. (La figure montre un détail de joint à rainure unique avec un chanfrein de  $25^{\circ}$  à  $35^{\circ}$  dans le tuyau ou le tube) ;
- (2) Vue en plan de la plaque insérée avec chanfreins. (La figure montre une plaque avec un détail de joint unilatéral) ;
- (3) Vue de côté avec chanfreins de bord. (D'autres détails de joint et des chanfreins peuvent être utilisés, comme approprié pour un joint de soudure particulier) ;

Vue de côté de la plaque d'insertion soudée dans le tube.

- **Limitations**

Lors de l'application de cette méthode de réparation, il faut tenir compte de la compatibilité des matériaux, des conditions de fonctionnement pendant la durée de vie du composant, du montage et du soudage afin de minimiser les contraintes résiduelles et les déformations.

- **Matériaux dissemblables :**

L'utilisation de matériaux dissemblables (métal de base et soudures) n'est pas interdite, mais les matériaux doivent répondre aux exigences et aux propriétés mécaniques minimales pour le composant, et doit être soigneusement évalué pour la compatibilité entre les matériaux dissemblables et l'environnement de service, à la fois interne et externe. Si la fatigue thermique est une possibilité, il

faut tenir compte du risque de fissuration par fatigue accélérée dans la combinaison de métaux dissemblables

#### IV.12 Calcul de résistance des tubes après ajoutant un Manchons de renforcement

##### IV.12.1 Calcul de la contrainte après ajoutant un Manchons de renforcement

$$\sigma = \frac{p}{2} \left( \frac{D_0}{\delta_a} - 1 \right) = \frac{p}{2} \left( \frac{D_i}{\delta_a} + 1 \right)$$

Où :

$\sigma$  : Contrainte actuelle de la pression interne, exprimée en MPa ;

$\delta_a$  : Épaisseur actuel, en mm ;

Dans ce calcul on va prendre en considérations le cas le plus sévère, c'est le cas du tube N° 13 de la passe D, du four F-102.

L'épaisseur mesurée étant de 5,11 mm. avec l'épaisseur du manchons 7.11mm

Donc  $\delta_a = 5.11 + 7.11 = 12.22$  dans ce cas le calcul devient :

$$\sigma = \frac{1.836}{2} \left( \frac{182.52}{12.22} - 1 \right) = 12.8 \text{ MPa}$$

##### IV.12.2 Calcul de la contrainte thermique limite

$$\text{on a } y = \frac{D_0}{D_i} = \frac{182.52}{182.52 - (2 \times 12.22)} = 1.16$$

donc

$$\sigma_{T, \text{lim1}} = 2\sigma_y - y\sigma_0 ; [\text{MPa}] \quad \sigma_{T, \text{lim1}} = 465 \text{ MPa} ;$$

$$\sigma_{T, \text{lim2}} = 4(\sigma_y - \sigma_0) ; [\text{MPa}]$$

$$\sigma_{T, \text{lim2}} = 909 \text{ MPa} ;$$

#### IV.13 Calcul de la durée de vie restante après ajoutant un Manchons de renforcement

La durée de vie restante est calculée par la formule suivante :

$$t_r = \frac{\delta a - \delta a_{\min}}{\tau} \text{ [an]}$$

Avec

$$\tau = \left| \frac{\delta i - \delta a}{t} \right| \text{ [mm /an]}$$

Pour l'épaisseur perdue = 6 mm

Durée de vie design	13.3 ans	116468,8 heures
Conversion (an/JR)	1 an	365 jours
Conversion (an/HR)	1 an	8760 heures
Temps de service	8 ans	70080 heures
Epaisseur initial	12.22 mm	...
Epaisseur actuel	6.22 mm	...
Epaisseur minimum	4,64 mm	...
Taux d'usure	0,75 mm/an	...
Temps avant rupture	2.1 ans	18396 heures
Durée perdue par l'usure	3.2 ans	28032 heures
Temps normalement restant	5.3 ans	46428 heures

## Conclusion générale

Ce travail a été accompli dans un contexte industriel et en réponse à des exigences spécifiques, ce qui lui permet de contribuer autant que possible à résoudre des problèmes réels et pertinents dans l'industrie pétrolière, tels que l'usure des composants des machines, qui entraînent directement la défaillance des équipements, comme c'est le cas des fours de la raffinerie RA2K, qui font l'objet de notre étude.

Après avoir combiné les connaissances théoriques et pratiques, nous avons conclu que les véritables causes de ce phénomène sont liées à plusieurs facteurs de divers degrés d'importance, tels que :

- Les supports guides intermédiaires sont utilisés comme un outil de coupe en raison de l'angle d'attaque favorisant l'abrasion du métal ;
- Il est très probable que les tubes flambent, ce qui explique la charge de contact entre les tubes et les supports ;
- Il n'est pas exclu de prendre en compte le phénomène de fluage des tubes, qui est causé par la fatigue thermique.

## **Recommandations**

Selon l'analyse des résultats des calculs, il a été constaté que les tubes qui sont soumis à l'usure conservent leur résistance aux contraintes, mais il sera inacceptable de constater une diminution continue des parois des tubes. Ainsi, à la fin de cette étude, nous pouvons récapituler quelques suggestions :

- Il est nécessaire de supprimer l'angle d'attaque dans les supports en utilisant une méthode adéquate, ainsi que de suivre l'état des tubes après cette modification.
  - Il est nécessaire de compléter l'intervention en réparant les parois externes des tubes avec une solution fiable, comme mentionné dans ce mémoire.
  - Il est nécessaire de vérifier la verticalité des tubes pour garantir que l'effort de contact entre les tubes et les supports est nul. Il est essentiel de corriger la verticalité en cas de défaut.
- En prenant en considération la mise en œuvre des recommandations issues de cette étude, suivie d'une étude supplémentaire, il sera possible d'assurer un service optimal et de prolonger la durée de vie des composants des fours, tout en réduisant les frais de maintenance.

## Références Bibliographiques

- [1] : Raffinerie RA2K. Présentation du site RA2K.
- [2] : Manuel d'opération Unité-100. *Manuel Opérateur*. 2011.
- [3] : Manuel d'opération Unité 500. *Manuel Opérateur*. 2011.
- [4] : M.Ayachi Ammar, Etude analytique et amélioration FMD des pompes centrifuge procès 100-PM-114A/B, Projet professionnel de fin formation, Institut Algérien du pétrole Ecole de Boumerdes, Avril 2017
- [5] : Bekhouche Manel et Louahem Amina, Phénomène de corrosion dans les condenseurs, Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Supérieure des Mines et Métallurgie ENSMM Annaba, Juin 2015.
- [6] : Manuel opératoire du complexe topping condensat de Skikda (2009)
- [7] : P.WUITHIER, le pétrole, raffinage et génie chimique, tome I et tome II, 2<sup>ème</sup> édition, 1972 paris.
- [8] : M. Touiker , Généralités Sur Le Raffinage , Ecole Des Techniques Pétrolières DeSKIKDA , IAP-CU SKIKDA (2006)..
- [9] : L.Carlos Pereira de Oliveira. Développement d'une méthodologie de modélisation cinétique de procédés de raffinage traitant des charges lourdes. ENS LYON, 2013.
- [10]: SAMI MATAR, Lewis.F.hatch, <<chemistry petrochemical processes>> . 2<sup>ème</sup> Edition,(2000).
- [11] : Livre de la société nationale de raffinage de pétrole
- [12] : J.P., WAUQUIER, Procédés de séparation Paris : Edition Technip, publication del'institut français de pétrole, Tome 2, (1998)
- [13] : M.H. Sellami, Génie des séparations, université Kasdi Merbah, Ouargla, 2015,
- (14)-Seader, J. D., Henley, E. J., & Roper, D. K. (2010). *Separation Process Principles*. John Wiley & Sons.
- [15] : Towler, G., & Sinnott, R. K. (2013). *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*. Elsevier.

- [16] : Ludwig, E. E. (2001). *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*. Gulf Professional Publishing.
- [17] : mémoire sur Contribution à l'étude énergétique d'un système à cycle combiné pour la production de l'énergie électrique Cas de la centrale thermique « Koudiet Ed- Draouch » de madam Tabet Sara  
Update, March 2007, Electric Power Research Institute, Inc.
- [18] : Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2014). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education.
- [19] : Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons.
- [20] : Stoecker, W. F., & Jones, J. W. (1982). *Refrigeration and Air Conditioning*. McGraw-Hill.
- [21] : Kuppan, T. (2000). *Heat Exchanger Design Handbook*. Marcel Dekker, Inc.
- [22] : Wuithier, Pierre. *Le pétrole, Raffinage et génie chimique*. s.l. : TECHNIP, 1972
- [23] : Boudjadi, Mohamed Amir. Mémoire. *Etude du Rendement Thermique des Fours avec et sans la mise en service du préchauffeur d'air (Raffinerie de Condensat RA2K)*. 2017[24] : ENSPM Formation industrie. *Matériel thermique*. s.l. : IFP Training, 2005.
- [24] : ENSPM Formation industrie. *Matériel thermique*. s.l. : IFP Training, 2005.
- [25] : P. Trambouze, *Le raffinage du pétrole, Matériaux et Equipements*, éd. Technip (1999)
- [26] : J.C. Guibet, *Carburants et Moteurs : Technologies, Energie, Environnement*, éd. Technip (1997)
- [27] : J. LE Nogues, *Etudes des fours pétroliers et pétrochimiques*, éd. Technip (1974)
- [28] : "Gas Burner Technology: Evolution and Safety," *Journal of Home Appliances*.
- [29] : "Industrial Chimneys: Design and Construction," *Engineering Journal*.

- [30]: "Heat Recovery in Industrial Furnaces," Journal of Industrial Heating.
- [31]: "Advances in Recuperative and Regenerative Heat Exchangers," Energy Efficiency Journal.
- [32]: "Materials for High-Temperature Heat Exchangers," Materials Science and Engineering.
- [33]: "Combustion and Heat Transfer in Industrial Furnaces," Journal of Industrial Heating.
- [34]: "Industrial Combustion Processes," Journal of Manufacturing Science and Engineering.
- [35]: "Optimization of Combustion Systems," Journal of Applied Thermal Engineering.
- [36]: Bhushan, B. (2001). Modern Tribology Handbook, Two Volume Set. CRC Press.
- [37]: Stachowiak, G.W., & Batchelor, A.W. (2014). Engineering Tribology. Butterworth-Heinemann.
- [38]: Hutchings, I.M., & Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Butterworth-Heinemann, 2017.
- [39]: Holmberg, K., & Mathews, A. (2009). Coatings Tribology: Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering. Elsevier.
- [40]: TOUBALI, O. Cours usure IAP. Boumerdès : IAP, 2015.
- [41]: Rabinowicz, E. (1995). Friction and Wear of Materials. John Wiley & Sons.
- [42]: BOUZAIIB. *Rapport d'inspection*. Dpt Technique : Sce Inspection, 2011
- [43]: D. MEGUELLATI. *Rapports d'inspection*. Dpt Technique : Sce Inspection, 2013
- [44]: N. ARFI, A. BECHIR &. *Rapports d'inspection*. s.l. : Inspecteurs VINCOTTE, 2016
- [45]: API 530. *Calculation of Heater-tube Thickness in Petroleum Refineries*. s.l. : sixth edition, September 2008

Annexe A : Caractéristiques de fonctionnements et des composants des fours de la raffinerie  
RA2KFiche technique du four 100-F-101

CONDITIONS DE DESIGN DE COMBUSTION					
1	LIMITATIONS DE LOT:		LIMITATIONS DE CHEMINÉE:		REV
2	LIMITATIONS DU TUBE:		LIMITATIONS DU BRUIT:	<85 dbA at 1 m	
3	DONNÉES DU DESSIN STRUCTURAL: VELOCITE DE VENT:		PRESENCE DE VENT:		
4		CHARGE DE NIEGE:		ZONE SISMIQUE:	
5	TEMPERATURE D'AIR D'ENVIRONNEMENT MIN./NORM./MAX., C.	17/47	HUMIDITE RELATIVE, %	72	
6	SECTION DU CHAUFFAGE:		Radiateur	Convect.	
7	SERVICE:		Procédé	Procédé	
8	<b>DESIGN DE LA BOBINE:</b>				
9	DESIGN DE BASE: EPAISSEUR DES PAROIS DU TUBE (CODE ou	API 530	API 530		
10	FORCE DE RUPTURE (MIN. ou MOYENNE)				
11	CONTRAINTES JUSQU'À LA BASE DE RUPTURE, HR.	100000	100000		
12	PRESSION DE DESIGN, ELASTIQUE / RUPTURE, Kpa(g)	1800,5	1800,5		
13	TEMPERATURE DE FLUIDE DE DESIGN, C.	238	238		C
14	TOLERANCE DE TEMPERATURE, C.				
15	TOLERANCE DE CORROSION, TUBES / ACCESSOIRES, mm	3,2/3,2	3,2/3,2		C
16	PRESSION AU TEST HYDROSTATIQUE, Kpa(g)	3570			C
17	TRAITEMENT CHALEUR POST-SOUDURE (OUI ou NON)	non	non		
18	POURCENTAGE DES SOUDURES RADIOGRAPHIEES	10%	10%		
19	TEMPERATURE MAXIMALE DU METAL DU TUBE (LIBRE), C.	285	310		
20	TEMPERATURE DU METAL DU TUBE DE DESIGN, C.	382	382		
21	COEFFICIENT DU FILM INTERNE, W/m <sup>2</sup> - C.				
22	<b>DISPOSITION DE LA BOBINE:</b>				
23	ORIENTATION DU TUBE: VERTICAL ou HORIZONTAL	Vertical	Horizontal		
24	MATÉRIEL DU TUBE (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	A 106 B			B
25	DIAMÈTRE EXTERNE DU TUBE, mm	168,3	168,3		
26	ÉPAISSEUR DES PAROIS DU TUBE, (MINIMUM) (MOYENNE), mm	7,11 AW	7,11 AW		
27	NUMÉRO DES PASSAGES DU FLUX	6	6		
28	NUMÉRO DES TUBES	72	72		
29	NUMÉRO DES TUBES PAR LIGNE (SECTION DE CONVECTION)		9		
30	LONGUEUR D'ENSEMBLE DU TUBE, m	16,4	6,203		
31	LONGUEUR EFFECTIVE DU TUBE, m	16,879	5,677		
32	TUBES BASIQUE: NUMÉRO	72	36		
33	SURFACE TOTALE EXPOSEE, m <sup>2</sup>	643	108		
34	TUBES VASTE SURFACE: NUMÉRO	0	36		
35	SURFACE TOTALE EXPOSEE, m <sup>2</sup>	0	798		
36	DISPOSITION DES TUBES (EN LIGNE ou ECHELONNES)	EN LIGNE	ECHEL.		
37	ÉCHEL. DES TUBES, CENT. à CENT.: HORIZ X DIAG (ou VERT.)	305	305x264		
38	ÉCHEL. DES TUBES CENT. à PAROIS DU FOUR (MIN.), mm	229	152,5		C
39	ENCORBELLEMENT (OUI ou NON)	NON	oui (pas sur la 1ère ligne des tubes bouc.		C
40	LARGEUR DE L'ENCORBELLEMENT, mm		152,5		C
41	<b>DESCRIPTION DE VASTE SURFACE:</b>				
42	TYPE: (GOUJONS) (AILETTES STRIÉES) (AILETTES MASSIVES)		Ailettes		
43	MATÉRIEL		Acier au C.		
44	DIMENSIONS (HAUTEUR X DIAMÈTRE / ÉPAISSEUR), mm		19x1,3		
45	ÉCHELONNEMENT (AILETTES / mm) (GOUJONS / PLAN)		150/m		
46	PIC DE TEMPÉRATURE MAX., (CALCULÉ), C.		369		B
47	RAPPORT D'EXTENSION (SURFACE TOTALE / SURFACE NUE)		7,39		
48	<b>COLLECTEUR DE CHAUDIÈRE DE TYPE BOUCHON:</b>				
49	TYPE				
50	MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)				
51	TENSION DE SERVICE NOMINALE				
52	PLACEMENT (L'UNE ou LES DEUX EXTRÉMITÉS)				
53	JOINT SAUDÉ ou ROULÉ				

CONDITIONS DE DESIGN MÉCANIQUE (Cont.)					
1	SECTION DU GÉNÉRATEUR DE CHALEUR	Radiateur	Convection		RÉV
2	SERVICE				
3	<b>COUDES DOUBLES:</b>				
4	TYPE	SR	SR		
5	MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	A 234 WPB			B
6	TENSION DE SERVICE NOMINALE ou PLAN	comme tube			
7	PLACEMENT (B.R. = BOITE DE RETOUR H.B. = BOITE DU FEU)	B.R.	B.R.		
8	<b>BORNES ET / OU COLLECTEURS:</b>				
9	TYPE (CH.= CHANFREINÉ COLL.= COLLECTEUR BR.= BRIDÉ)	BR.	BR.		
10	ENTRÉE: MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)		A106B		B
11	DIMENSION / PLAN ou ÉPAISSEUR		6"Sch40AW		B
12	NUMÉRO DE BORNES		6		B
13	MATÉRIEL DE BRIDE (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)		A 105		B
14	DIMENSION ET CLASSIFICATION DE BRIDE		300#WNRF		B
15	SORTIE: MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	A106B			B
16	DIMENSION / PLAN ou ÉPAISSEUR	6"Sch40AW			B
17	NUMÉRO DE BORNES	6			B
18	MATÉRIEL DE BRIDE (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	A 105			B
19	DIMENSION ET CLASSIFICATION DE BRIDE	300#WNRF			B
20	CONNECTION CONNECTEUR-TUBE (SOUDURE, EXTRUSION, etc.)				
21	PLACEMENT DU COLLECTEUR (INTERNE ou EXTERNE B.R.)				
22	<b>CROISEMENTS:</b>				
23	SOUDÉ ou À BRIDES)	Soudé			
24	MATÉRIEL DU CONDUIT (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	A106B			B
25	DIMENSION / PLAN ou ÉPAISSEUR DU CONDUIT	6"Sch40AW			
26	MATÉRIEL DE BRIDE	Inapplicable			C
27	DIMENSION / CLASSIFICATION DE BRIDE	Inapplicable			C
28	PLACEMENT (INTERNE / EXTERNE)	Externe			
29	TEMPÉRATURE DU FLUIDE, C.				
30	<b>SUPPORTS TUBE:</b>				
31	PLACEMENT (EXTRÉMITÉS, SOMMET, FOND)	Sommet	Extrémités		
32	MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	25Cr 20Ni	Acier au C.		
33	TEMPÉRATURE DU MÉTAL DE DESIGN, C.	951			C
34	ÉPAISSEUR, mm		13		
35	TYPE ET ÉPAISSEUR D'INSULATION, mm		LWC, 100		
36	ANCRAGE (MATÉRIEL ET TYPE)		Type V, 18 Cr 8 Ni		
37	<b>SUPPORTS INTERMÉDIAIRES DU TUBE:</b>				
38	MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	25Cr 20Ni	Non		
39	TEMPÉRATURE DU MÉTAL DE DESIGN, C.	951			C
40	ÉPAISSEUR, mm				
41	ECHELONNEMENT, m	1 set			
42	<b>GUIDES TUBE:</b>				
43	PLACEMENT:	Fond			
44	MATÉRIEL:	Pin (AISI 310) + Interrupteur (AISI304)			
45	TYPE / ÉCHELONNEMENT:				
46	<b>BOÎTES DE RETOUR:</b>				
47	PLACEMENT:	Section de Convection	PORTE FERRÉE / PANNEAU BOULONNÉ	Bouloonné	
48	MATÉRIEL DE CARTER:	Acier au carbon	ÉPAISSEUR, mm:	5	
49	MATÉRIEL DE REVÊTEMENT	LWC 1:2:4	ÉPAISSEUR, mm:	50	
50	ANCRE (MATÉRIEL ET TYPE):	Type V, Acier au Carbon			

## Fiche technique du four 100-F-102

CONDITIONS DE DESIGN DE COMBUSTION					
1	LIMITATIONS DE LOT:		LIMITATIONS DE CHEMINÉE:		RÉV
2	LIMITATIONS DU TUBE:		LIMITATIONS DU BRUIT: <85 dbA at 1 m		
3	DONNÉES DU DESSIN STRUCTURAL: VELOCITE DE VENT:		PRESENCE DE VENT:		
4		CHARGE DE NIEGE:	ZONE SISMIQUE:		
5	TEMPERATURE D'AIR D'ENVIRONNEMENT (MIN/NORM./MAX., C): 11/14/17		HUMIDITE RELATIVE, %	72	
6	SECTION DU CHAUFFAGE:	Radiateur	Convect.		
7	SERVICE:	Procédé	Procédé		
8	<b>DESIGN DE LA BOBINE:</b>				
9	DESIGN DE BASE: EPAISSEUR DES PAROIS DU TUBE (COD)	API 530	API 530		
10	FORCE DE RUPTURE (MIN. ou MOYENNE)				
11	CONTRAINTÉ JUSQU'À LA BASE DE RUPTURE, HR.	100000	100000		
12	PRESSION DE DESIGN, ELASTIQUE / RUPTURE, Kpa(g)	1800,5	1800,5		
13	TEMPERATURE DE FLUIDE DE DESIGN, C.	238	238		C
14	TOLERANCE DE TEMPERATURE, C.				
15	TOLERANCE DE CORROSION, TUBES / ACCESSOIRES, mm	3,2/3,2	3,2/3,2		C
16	PRESSION AU TEST HYDROSTATIQUE, Kpa(g)	3825,5	3825,5		
17	TRAITEMENT CHALEUR POST-SOUDURE (OUI ou NON)	non	non		
18	POURCENTAGE DES SOUDURES RADIOGRAPHIEES	10%	10%		
19	TEMPERATURE MAXIMALE DU METAL DU TUBE (LIBRE), C.	277	310		
20	TEMPERATURE DU METAL DU TUBE DE DESIGN, C.	390	390		
21	COEFFICIENT DU FILM INTERNE, W/m2 - C.				
22	<b>DISPOSITION DE LA BOBINE:</b>				
23	ORIENTATION DU TUBE: VERTICAL ou HORIZONTAL	Vertical	Horizontal		
24	MATÉRIEL DU TUBE (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	A 106 B			B
25	DIAMÉTRE EXTERNE DU TUBE, mm	168,3	168,3		
26	ÉPAISSEUR DES PAROIS DU TUBE, (MINIMUM) (MOYENNE)	7,11 AW	7,11 AW		
27	NUMÉRO DES PASSAGES DU FLUX	4	4		
28	NUMÉRO DES TUBES	64	48		
29	NUMÉRO DES TUBES PAR LIGNE (SECTION DE CONVECTION)		6		
30	LONGEUR D'ENSEMBLE DU TUBE, m	15,6	6,203		
31	LONGUEUR EFFECTIVE DU TUBE, m	16,079	5,677		
32	TUBES BASIQUE: NUMÉRO	64	24		
33	SURFACE TOTALE EXPOSEE, m2	544	72		
34	TUBES VASTE SURFACE: NUMÉRO	0	24		
35	SURFACE TOTALE EXPOSEE, m2	0	697		
36	DISPOSITION DES TUBES (EN LIGNE ou ECHELONNES)	EN LIGNE	ECHEL.		
37	ECHEL. DES TUBES, CENT. à CENT.: HORIZ X DIAG (ou VER)	305	305x264		
38	ECHEL. DES TUBES CENT. à PAROIS DU FOUR (MIN.), mm	229	152,5		C
39	ENCORBELLEMENT (OUI ou NON)	NON	oui (pas sur la 1ère ligne des tubes bouc		C
40	LARGEUR DE L'ENCORBELLEMENT, mm		152,5		C
41	<b>DESCRIPTION DE VASTE SURFACE:</b>				
42	TYPE: (GOIJONS) (AILETTES STRIÉES) (AILETTES MASSIVES)		Ailettes		
43	MATÉRIEL		Acier au C.		
44	DIMENSIONS (HAUTEUR X DIAMÉTRE / ÉPAISSEUR), mm		25x1,5		
45	ÉCHELONNEMENT (AILETTES / mm) (GOIJONS / PLAN)		150/m		
46	PIC DE TEMPÉRATURE MAX., (CALCULÉE), C.		420		B
47	RAPPORT D'EXTENSION (SURFACE TOTALE / SURFACE NUE)		9,68		
48	<b>COLLECTEUR DE CHAUDIERE DE TYPE BOUCHON:</b>				
49	TYPE				
50	MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)				
51	TENSION DE SERVICE NOMINALE				
52	PLACEMENT (L'UNE ou LES DEUX EXTRÉMITÉS)				
53	JOINT SAUDÉ ou ROULÉ				

CONDITIONS DE DESIGN MÉCANIQUE (Cont.)					
1	SECTION DU GÉNÉRATEUR DE CHALEUR	Radiateur	Convection		REV
2	SERVICE				
3	<b>COUDES DOUBLES:</b>				
4	TYPE	SR	SR		
5	MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	A 234 WPB			B
6	TENSION DE SERVICE NOMINALE ou PLAN	comme tube			
7	PLACEMENT (B.R. = BOÎTE DE RETOUR B.F. = BOÎTE DU FEU)	B.R.	B.R.		
8	<b>BORNES ET / OU COLLECTEURS:</b>				
9	TYPE (CH.= CHANFREINÉ COLL.= COLLECTEUR BR.= BRIDÉ)	BR.	BR.		
10	ENTRÉE: MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)		A106B		B
11	DIMENSION / PLAN ou ÉPAISSEUR		6"Sch40AW		B
12	NUMÉRO DE BORNES		4		B
13	MATÉRIEL DE BRIDE (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)		A 105		B
14	DIMENSION ET CLASSIFICATION DE BRIDE		300#WNRF		B
15	SORTIE: MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	A106B			B
16	DIMENSION / PLAN ou ÉPAISSEUR	6"Sch40AW			B
17	NUMÉRO DE BORNES	4			B
18	MATÉRIEL DE BRIDE (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	A 105			B
19	DIMENSION ET CLASSIFICATION DE BRIDE	300#WNRF			B
20	CONNECTION CONNECTEUR-TUBE (SOUDURE, EXTRUSION, etc.)				
21	PLACEMENT DU COLLECTEUR (INTERNE ou EXTERNE B.R.)				
22	<b>CROISEMENTS:</b>				
23	SOUDÉ ou À BRIDES)	Soudé			
24	MATÉRIEL DU CONDUIT (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	A106B			B
25	DIMENSION / PLAN ou ÉPAISSEUR DU CONDUIT	6"Sch40AW			
26	MATÉRIEL DE BRIDE	Inapplicable			C
27	DIMENSION / CLASSIFICATION DE BRIDE	Inapplicable			C
28	PLACEMENT (INTERNE / EXTERNE)	Externe			
29	TEMPÉRATURE DU FLUIDE, C.				
30	<b>SUPPORTS TUBE:</b>				
31	PLACEMENT (EXTRÉMITÉS, SOMMET, FOND)	Sommet	Extrémités		
32	MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	25Cr 20Ni	Acier au C.		
33	TEMPÉRATURE DU MÉTAL DE DESIGN, C.	947			C
34	ÉPAISSEUR, mm		13		
35	TYPE ET ÉPAISSEUR D'INSULATION, mm		LWC, 100		
36	ANCRAGE (MATÉRIEL ET TYPE)		Type V, 18 Cr 8 Ni		
37	<b>SUPPORTS INTERMÉDIARES DU TUBE:</b>				
38	MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	25Cr 20Ni	Non		
39	TEMPÉRATURE DU MÉTAL DE DESIGN, C.	947			C
40	ÉPAISSEUR mm				
41	ÉCHELONNEMENT, m	1 set			
42	<b>GUIDES TUBE:</b>				
43	PLACEMENT:	Fond			
44	MATÉRIEL:	Pin (AISI 310) + Interrupteur (AISI304)			
45	TYPE / ÉCHELONNEMENT:				
46	<b>BOÎTES DE RETOUR:</b>				
47	PLACEMENT:	Section de Convection	PORTE FERRÉE / PANNEAU BOULONNÉ (Boulonné)		
48	MATÉRIEL DE CARTER:	Acier au Carbon	ÉPAISSEUR, mm:	5	
49	MATÉRIEL DE REVÊTEMENT LWC 1:2:4		ÉPAISSEUR, mm:	50	
50	ANCRE (MATÉRIEL ET TYPE):	Type V, Acier au Carbon			

## Fiche technique du four 100-F-103

CONDITIONS DE DESIGN DE COMBUSTION					
1	LIMITATIONS DE LOT:		LIMITATIONS DE CHEMINÉE:		RE
2	LIMITATIONS DU TUBE:		LIMITATIONS DU BRUIT:	<85 dbA at 1 m	
3	DONNEES DU DESSIN STRUCTURAL: VELOCITE DE VENT:		PRESENCE DE VENT:		
4	CHARGE DE NIEGE:		ZONE SISMIQUE:		
5	TEMPERATURE D'AIR D'ENVIRONNEMENT MIN./NORM./MAX., C:	17/47	HUMIDITE RELATIVE, %	72	
6	SECTION DU CHAUFFAGE:	Radiateur	Convect.		
7	SERVICE:	Procédé	Procédé		
8	<b>DESIGN DE LA BOBINE:</b>				
9	DESIGN DE BASE: EPAISSEUR DES PAROIS DU TUBE (COD)	API 530	API 530		
10	FORCE DE RUPTURE (MIN. ou MOYENNE)				
11	CONTRAINTTE JUSQU'À LA BASE DE RUPTURE, HR.	100000	100000		
12	PRESSION DE DESIGN, ELASTIQUE / RUPTURE, Kpa(g)	1539,6	1539,6		
13	TEMPERATURE DE FLUIDE DE DESIGN, C.	376	376		C
14	TOLERANCE DE TEMPERATURE, C.				
15	TOLERANCE DE CORROSION, TUBES / ACCESSOIRES, mm	3,2/3,2	3,2/3,2		C
16	PRESSION AU TEST HYDROSTATIQUE, Kpa(g)	4675,8			B
17	TRAITEMENT CHALEUR POST-SOUDURE (OUI ou NON)	OUI	OUI		
18	POURCENTAGE DES SOUDURES RADIOGRAPHIEES	100%	100%		
19	TEMPERATURE MAXIMALE DU METAL DU TUBE (LIBRE), C.	455	472		
20	TEMPERATURE DU METAL DU TUBE DE DESIGN, C.	492	492		
21	COEFFICIENT DU FILM INTERNE, W/m2 - C.				
22	<b>DISPOSITION DE LA BOBINE:</b>				
23	ORIENTATION DU TUBE: VERTICAL ou HORIZONTAL	Vertical	Horizontal		
24	MATÉRIEL DU TUBE (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	A 335 P5			B
25	DIAMÈTRE EXTERNE DU TUBE, mm	168,3	168,3		
26	ÉPAISSEUR DES PAROIS DU TUBE, (MINIMUM) (MOYENNE)	7,11 AW	7,11 AW		
27	NUMÉRO DES PASSAGES DU FLUX	8	8		
28	NUMÉRO DES TUBES	80	96		
29	NUMÉRO DES TUBES PAR LIGNE (SECTION DE CONVECTION)		8		
30	LONGEUR D'ENSEMBLE DU TUBE, m	16,422	8,259		
31	LONGUEUR EFFECTIVE DU TUBE, m	16,901	7,733		
32	TUBES BASIQUE: NUMÉRO	80	24		
33	SURFACE TOTALE EXPOSEE, m2	714	98		
34	TUBES VASTE SURFACE: NUMÉRO	0	72		
35	SURFACE TOTALE EXPOSEE, m2	0	3651		
36	DISPOSITION DES TUBES (EN LIGNE ou ECHELONNES)	EN LIGNE	ÉCHEL.		
37	ÉCHEL. DES TUBES, CENT. à CENT.: HORIZ X DIAG (ou VER)	305	305x264		
38	ÉCHEL. DES TUBES CENT. à PAROIS DU FOUR (MIN.), mm	229	152,5		C
39	ENCORBÈLEMENT (OUI ou NON)	NON	oui (pas sur la 1ère ligne des tubes bouclier)		C
40	LARGEUR DE L'ENCORBÈLEMENT, mm		152,5		C
41	<b>DESCRIPTION DE VASTE SURFACE:</b>				
42	TYPE: (GOIJONS) (AILETTES STRIÉES) (AILETTES MASSIVES)		Ailettes		
43	MATÉRIEL	11-13Cr; dernières 3 lignes Acier au C.			
44	DIMENSIONS (HAUTEUR X DIAMÈTRE / ÉPAISSEUR), mm		25x1,5		
45	ÉCHELONNEMENT (AILETTES / mm) (GOIJONS / PLAN)		197/m		
46	PIC DE TEMPÉRATURE MAX., (CALCULÉE), C.		526		B
47	RAPPORT D'EXTENSION (SURFACE TOTALE / SURFACE NUE)		12,4		
48	<b>COLLECTEUR DE CHAUDIÈRE DE TYPE BOUCHON:</b>				
49	TYPE				
50	MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)				
51	TENSION DE SERVICE NOMINALE				
52	PLACEMENT (L'UNE ou LES DEUX EXTRÉMITÉS)				
53	JOINT SAUDE ou ROULE				

CONDITIONS DE DESIGN MÉCANIQUE (Cont.)					
1	SECTION DU GÉNÉRATEUR DE CHALEUR	Radiateur	Convection		REV
2	SERVICE				
3	<b>COUDES DOUBLES:</b>				
4	TYPE	SR	SR		
5	MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	A 234 WP5			B
6	TENSION DE SERVICE NOMINALE ou PLAN	comme tube			
7	PLACEMENT (B.R. = BOITE DE RETOUR H.B. = BOITE DU FEU)	B.R.	B.R.		
8	<b>BORNES ET / OU COLLECTEURS:</b>				
9	TYPE (CH.= CHANFREINÉ COLL.= COLLECTEUR BR.= BRIDÉ)	BR.	BR.		
10	ENTRÉE: MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)		A335P5		B
11	DIMENSION / PLAN ou ÉPAISSEUR		6"Sch40AW		B
12	NUMÉRO DE BORNES		8		B
13	MATÉRIEL DE BRIDE (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)		A182F5		B
14	DIMENSION ET CLASSIFICATION DE BRIDE		300#WNRF		B
15	SORTIE: MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	A335P5			B
16	DIMENSION / PLAN ou ÉPAISSEUR	6"Sch40AW			B
17	NUMÉRO DE BORNES	8			B
18	MATÉRIEL DE BRIDE (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	A182F5			B
19	DIMENSION ET CLASSIFICATION DE BRIDE	300#WNRF			B
20	CONNECTION CONNECTEUR-TUBE (SOUDURE, EXTRUSION, etc.)				
21	PLACEMENT DU COLLECTEUR (INTERNE ou EXTERNE B.R.)				
22	<b>CROISEMENTS:</b>				
23	SOUDÉ ou À BRIDES)	Welded			
24	MATÉRIEL DU CONDUIT (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	A335P5			B
25	DIMENSION / PLAN ou ÉPAISSEUR DU CONDUIT	6"Sch40AW			
26	MATÉRIEL DE BRIDE	Inapplicable			C
27	DIMENSION / CLASSIFICATION DE BRIDE	Inapplicable			C
28	PLACEMENT (INTERNE / EXTERNE)	Externe			
29	TEMPÉRATURE DU FLUIDE, C.				
30	<b>SUPPORTS TUBE:</b>				
31	PLACEMENT (EXTRÉMITÉS, SOMMET, FOND)	Sommet	Extrémités		
32	MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	25Cr 20Ni	Acier au C.		
33	TEMPÉRATURE DU MÉTAL DE DESIGN, C.	980			C
34	ÉPAISSEUR, mm		13		
35	TYPE ET ÉPAISSEUR D'INSULATION, mm		LWC, 100		
36	ANCRAGE (MATÉRIEL ET TYPE)		Type V, 18 Cr 8 Ni		
37	<b>SUPPORTS INTERMÉDIAIRES DU TUBE:</b>				
38	MATÉRIEL (SPÉCIFICATION ASTM ET DEGRÉ)	25Cr 20Ni	25/20, 19/9		
39	TEMPÉRATURE DU MÉTAL DE DESIGN, C.	980	920/625/500		C
40	ÉPAISSEUR mm				
41	ECHÉLONNEMENT, m	1 set	1 set		
42	<b>GUIDES TUBE:</b>				
43	PLACEMENT:	Fond			
44	MATÉRIEL:	Pin (AISI 310) + Interrupteur (AISI304)			
45	TYPE / ÉCHÉLONNEMENT:				
46	<b>BOÎTES DE RETOUR:</b>				
47	PLACEMENT:	Section de Convection	PORTE FERRÉE / PANNEAU BOULONNÉ		
48	MATÉRIEL DE CARTER:	Acier au Carbon	ÉPAISSEUR, mm:	5	
49	MATÉRIEL DE REVÊTEMENT:	LWC 1:2:4	ÉPAISSEUR, mm:	50	
50	ANCRE (MATÉRIEL ET TYPE):	Type V, Acier au Carbon			

## Annexe B : Tableaux du choix de l'épaisseur

Tableau 1 : Épaisseur minimale admissible pour un tube neuf

diamètre extérieur du tube		épaisseur minimum			
		tube en acier ferritique		tube en acier austénitique	
mm	in	mm	in	mm	in
0,3	,375	,4	,135	,4	,095
3,0	,875	,5	,178	,7	,105
8,9	,50	,8	,189	,7	,105
01,6	,00	,0	,198	,7	,105
14,3	,50	,3	,207	,7	,105
41,3	,563	,7	,226	,0	,117
68,3	,625	,2	,245	,0	,117
19,1	,625	,2	,282	,3	,130
73,1	0,75	,1	,319	,7	,144