

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université 8 Mai 1945 Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie des Procédés

Mémoire du Projet de fin d'étude

*2<sup>ème</sup> Année Master*

---



*Calcul des rendements thermiques  
des fours tubulaires avec et sans  
APH et du gain d'énergie*

---



Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

**Réalisé par :**

SOUDANI Ala Eddine

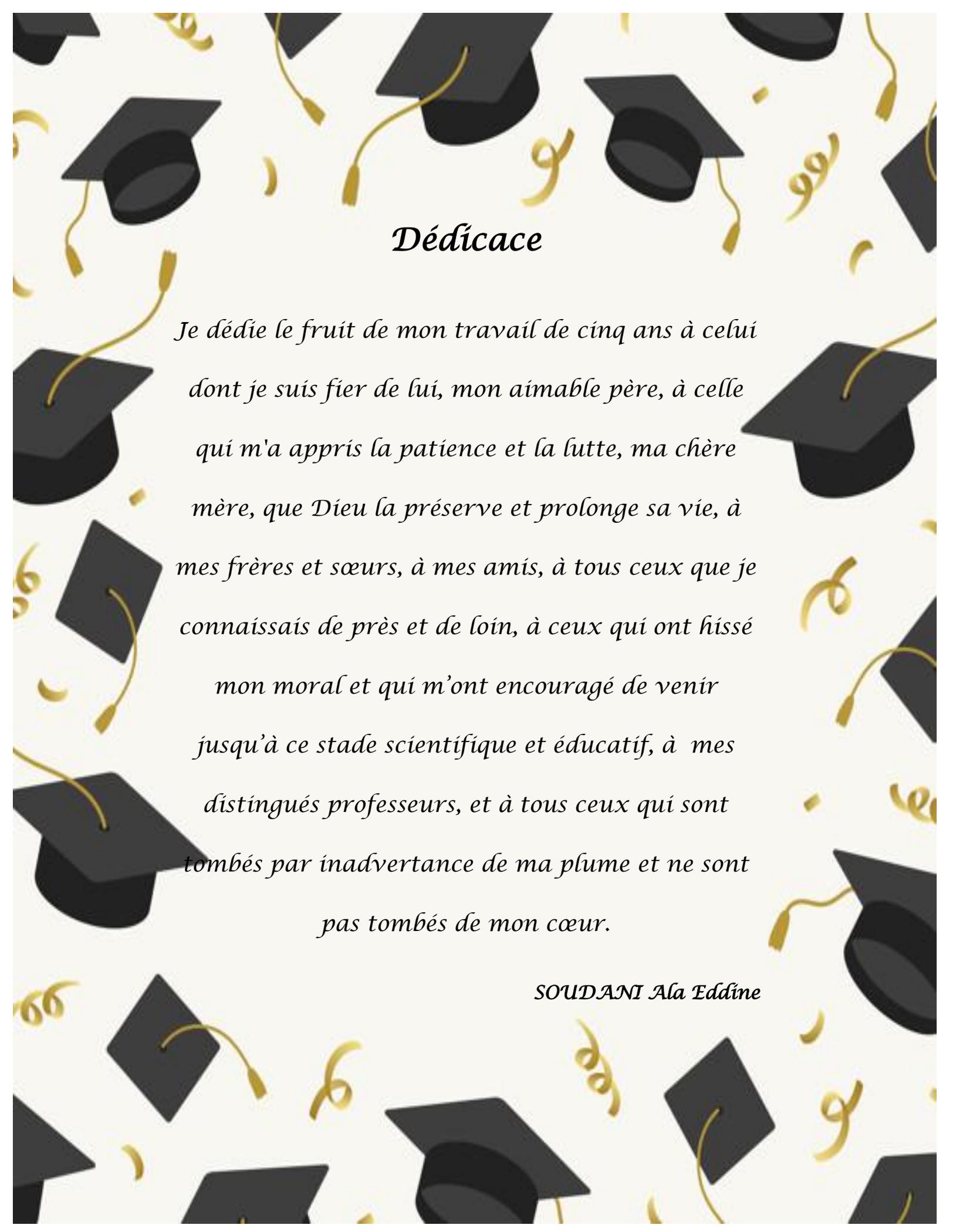
BEGHOUR Yassine

**Encadré par :**

Dr. BOUAKKAZ Samia

Dr. BENAYAHOU Ali

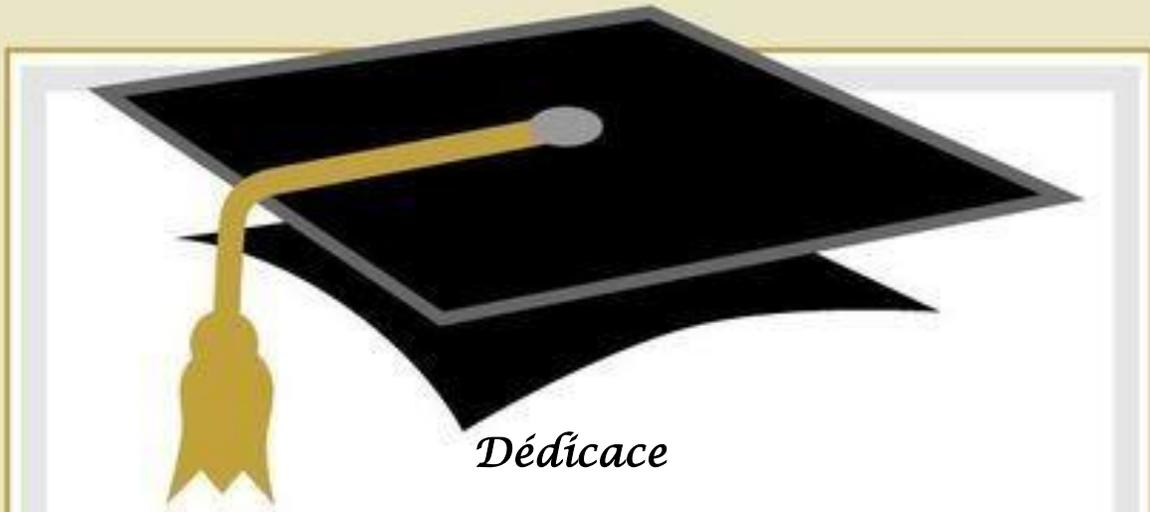
**2019/2020**

The background of the page is a repeating pattern of black graduation caps with gold tassels and gold streamers (confetti) scattered across a light cream color.

## *Dédicace*

*Je dédie le fruit de mon travail de cinq ans à celui dont je suis fier de lui, mon aimable père, à celle qui m'a appris la patience et la lutte, ma chère mère, que Dieu la préserve et prolonge sa vie, à mes frères et sœurs, à mes amis, à tous ceux que je connaissais de près et de loin, à ceux qui ont hissé mon moral et qui m'ont encouragé de venir jusqu'à ce stade scientifique et éducatif, à mes distingués professeurs, et à tous ceux qui sont tombés par inadvertance de ma plume et ne sont pas tombés de mon cœur.*

*SOUDANI Ala Eddine*



### *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma très chère mère qui pense toujours à  
moi en ma présence et en mon absence, à  
mon très cher père qui m'a donné force  
pour continuer mes études.*

*A mes très chères frères surtout le petit  
Oussama, à toute ma famille BEGHOUR  
et à mes amis et collègues sans exception.*

*Yassine BEGHOUR*





## *Remerciements*

Tout d'abord, nous remercions Dieu tout-puissant de nous avoir donné la force, le courage et la patience de compléter ce modeste travail.

Nous tenons à remercier nos chers parents pour leurs encouragements et leur soutien moral tout au long de ce travail

Nous remercions tout particulièrement notre encadreur, Mme Samia BOUAKKAZ pour son aide et ses conseils pendant la période de stage, pour ses précieuses observations et conseils, et pour nous avoir encouragés tout au long de ce travail, ainsi que pour son dévouement envers nous.

Nous tenons à remercier les ingénieurs de l'unité RA2K Sonatrach qui nous ont fourni un soutien et des conseils précieux en matière de connaissance.

Le responsable du laboratoire Fateh Bouchama, l'ingénieur kechicheb abd Rezak, l'ingénieur Abd Elsalam, l'ingénieur Youcef Dahmri et tous les ingénieurs du laboratoire de contrôle de qualité.

Nous remercions également nos distingués professeurs Malik BENDJABALLAH , CHERAITIA Aabdallah, KSOURI Rabah et BENHAMIDA Aida pour leurs connaissances et leur soutien moral.

Nous remercions toutes les personnes qui nous ont aidés et nous ont soutenus tout au long de l'élaboration de ce travail.

Sans oublier les membres de jury de notre soutenance.

*SOUDANI Ala Eddine*

*Yassine BEGHOUR*

## Résumé

Au niveau du complexe de raffinage de condensât à la raffinerie de Skikda, nous avons constaté que le dispositif APH était en défaillance et prenait des mois en étant isolé du four et cela était dû à l'absence d'opérations de maintenance, nous avons alors calculé le rendement des trois fours avec et sans APH et cela nous a aidé à connaître l'avantage de l'APH dans l'augmentation du rendement du four, ensuite nous avons déterminé les bénéfices du point de vue économique ainsi que l'amélioration de l'aspect environnemental en raison de l'utilisation de ce dispositif.

Tout ce travail était dans le but de sensibiliser les responsables de la raffinerie à la nécessité de prêter attention à l'APH en termes d'entretien et de contrôle technique, ce qui est bénéfique pour l'économie en composé et pour réduire les dommages environnementaux.

**Mots clés :** four, condensât, rendement, préchauffeur d'air.

## ملخص :

في مجمع تكرير المكثفات في مصفاة سكيكدة، وجدنا أن جهاز APH معطل ويمكن أن يستغرق شهوراً وهو معزول عن الفرن وهذا يرجع إلى عدم وجود عمليات صيانة، لذلك حسبنا مردود أداء الأفران الثلاثة مع وبدون APH وهذا ساعدنا على معرفة ميزة APH في زيادة كفاءة الفرن. ثم حددنا الفوائد الاقتصادية وكذلك تحسين الجانب البيئي نتيجة لاستخدام هذا الجهاز. وكان الهدف من كل هذا العمل هو توعية مسؤولي المصفاة بضرورة الاهتمام بالجهاز من حيث الصيانة والرقابة التقنية، مما يعود بالنفع على اقتصاد المركب والحد من الأضرار البيئية.  
**الكلمات الدالة :** فرن, النفط المكثف, مردود, مسخن الهواء

## Summary:

At the refining complex at the Skikda refinery, we found that the APH device was in failure and can take months by being insulated from the furnace and this is due to the lack of maintenance operations, so we calculated the performance of the three furnaces with and without APH and this helped us to know the advantage of the APH in increasing the oven efficiency. , then we determined the economic benefits as well as the improvement of the environmental aspect as a result of the use of this device.

All this work was aimed at raising awareness among refinery officials of the need to pay attention to the APH in terms of maintenance and technical control, which is beneficial for compound economy and to reduce environmental damage.

**Keywords:** oven, condensed oil, air heater.

Dédicaces	
Remerciements	
Résumé	i
Liste des figures	ii
Liste des tableaux	iv
Liste des abréviations	vi
Introduction générale	1

*Chapitre 1 : Généralités Sur Le Condensât*

1.1 Introduction.....	3
1.2 Le condensât .....	3
1.2.1 Définition du condensât .....	3
1.2.2 Gisements de gaz à condensât.....	3
1.2.3 Gaz à condensât .....	3
1.2.4 Caractéristiques du Condensât .....	4
1.2.5 Caractéristiques de la charge du TOPPING .....	4
1.2.6 Applications du Condensât .....	4
1.2.6.1 Application dans la pétrochimie .....	5
1.2.6.2 Application dans le raffinage .....	5
1.3 Principaux produits issus de condensât Algérien .....	5
1.3.1 Le Naphta.....	6
1.3.1.1 Définition du Naphta.....	6
1.3.1.2 Les différents types de naphta .....	6
1.3.1.3 Caractéristiques des naphtas.....	7
1.3.1.4 Spécifications du Naphta de RA2K.....	7
1.3.2 Le kérosène .....	7
1.3.2.1 Définition du kérosène .....	7
1.3.2.2 Point d'éclair du kérosène.....	8
1.3.2.3 Le point de congélation .....	8
1.3.2.4 Spécification du kérosène de RA2K.....	8

1.3.3 Butane .....	8
1.3.3.1 Définition du Butane .....	8
1.3.3.2 Spécifications du Butane de RA2K .....	9
1.3.4 LGO .....	9
1.3.4.1 Définition de LGO .....	9
1.3.4.2 Utilisation du LGO .....	9
1.3.4.3 Spécifications du LGO de RA2K .....	9
1.3.5 HGO .....	10
1.3.5.1 Définition de HGO .....	10
1.3.5.2 Spécification du HGO de RA2K .....	10
<b>Chapitre 2 : Présentation générale de la raffinerie RA2K</b>	
2.1 Introduction .....	11
2.2 Présentation générale de la raffinerie de Topping condensât RA2K .....	11
2.3 Historique de la raffinerie (RA2K) .....	11
2.4 Localisation géographique .....	11
2.5 Conception Générale du Complexe .....	12
2.5.1 Unité Topping de Condensât (Unité-100) .....	12
2.5.2 Unité de traitement du kérosène (U200) .....	12
2.5.3 Installations de stockage et de transfert des Produits Finis (U300) .....	12
2.5.4 Système torche (U400) .....	12
2.5.5 Les utilités (U500) .....	13
2.6 Fonctionnement de l'unité 100 .....	13
2.6.1 Train de préchauffeur .....	13
2.6.2 Distillation .....	13
2.6.2.1 Préfractionnement (Figure 2.3) .....	14
2.6.2.2 Distillation Atmosphérique .....	14
2.6.2.3 Distillation sous vide .....	18
2.6.3 Stabilisation des essences .....	18
2.6.4 Section de Dépropaniseur .....	19
2.6.5 Section de séchage de butane .....	20
<b>Chapitre 3: Les Fours Tubulaires</b>	
3.1 Introduction .....	21

3.2 Théorie de transfert de chaleur .....	21
3.2.1 Définition .....	21
3.2.2 Les modes de transfert de chaleur .....	21
3.2.2.1 Rayonnement .....	21
3.2.2.2 Conduction .....	22
3.2.2.3 Convection .....	22
3.3 La combustion dans les fours pétroliers .....	23
3.3.1 Comment la combustion se produit à l'intérieur du four ? .....	23
3.3.2 Réactions de combustion.....	23
3.3.3 La chaleur de combustion .....	24
3.3.4 Pouvoir calorifique inférieur PCI .....	24
3.3.5 Le pouvoir calorifique supérieur PCS .....	24
3.3.6 Excès d'air .....	24
3.3.7 Pouvoir comburivore.....	24
3.3.8 Pouvoir fumigène.....	25
3.4 Les Fours pétroliers.....	25
3.4.1 Définition .....	25
3.4.2 Rôle d'un Four .....	25
3.4.3 Différents types de four.....	25
3.4.4 Eléments d'un four tubulaire.....	27
3.4.4.1 Garnissage des parois du four (Enveloppe) .....	27
3.4.4.2 Faisceaux tubulaires .....	28
3.4.4.3 Les brûleurs.....	28
3.4.4.3.2 Importance du brûleur .....	29
3.4.4.3.3 Type des brûleurs .....	29
3.4.4.4 L'APH.....	30
3.4.4.4.1 Rôle de l'APH .....	30
3.4.4.4.2 Différents types de L'APH.....	31
<i>Chapitre 4: Calcul du Rendement Thermique et du Gain d'argent</i>	
4.1 But de l'Etude .....	32
4.2 Rendement thermique des fours .....	33
4.3 Méthodes de calcul du rendement thermique d'un four tubulaire .....	33

4.4 Données d'étude .....	34
4.5 Composition du gaz combustible .....	36
4.6 Pouvoir calorifique inférieur (PCI) des constituants du gaz combustible .....	37
4.7 Estimation du PCI du mélange de gaz combustible .....	37
4.8 Quantité de chaleur fournie par la combustion ( $Q_{\text{fournie}}$ ) .....	37
4.9 Réactions de combustion .....	40
4.10 Composition des fumées .....	40
4.10.1 Composition théorique des fumées .....	41
4.10.2 Composition réelle des fumées (avec excès d'air).....	44
4.11 Quantité de chaleur perdue par les fumées ( $Q_{\text{fumées}}$ ) .....	47
4.11.1 Calcul des débits molaires des fumées .....	48
4.11.2 Calcul de la chaleur spécifique de chaque constituant.....	50
4.11.3 Calcul des quantités de chaleur perdues par les fumées dans les trois fours, avec préchauffeur d'air .....	53
4.11.4 Calcul des quantités de chaleur perdues par les fumées dans les trois fours, sans préchauffeur d'air .....	57
4.12 Quantité de chaleur perdue par les parois.....	61
4.13 Calcul du rendement thermique .....	64
4.14 Calcul de l'énergie récupérée .....	65
4.15 Calcul du gain d'argent .....	66
4.16 Discussion des résultats .....	67
4.17 Les Avantages et les inconvénients du préchauffage de l'air .....	68
4.17.1 Les Avantages .....	68
4.17.2 Les inconvénients.....	69
 Conclusion Générale .....	 70
Références Bibliographiques .....	72
 Annexes .....	 I

## Liste des figures

Figures	Pages
<b>Figure 1.1</b> : Schéma synoptique des coupes pétrolières de Condensât.	<b>06</b>
<b>Figure 2.1</b> : Plan de situation du complexe RA2k.	<b>11</b>
<b>Figure 2.2</b> : Schéma de la section de préchauffeur.	<b>13</b>
<b>Figure 2.3</b> : Schéma de la section de préfractionnement.	<b>14</b>
<b>Figure 2.4</b> : Schéma de la distillation atmosphérique.	<b>15</b>
<b>Figure 2.5</b> : Schéma de deux colonnes de stripping.	<b>16</b>
<b>Figure 2.6</b> : Schéma de Reflux circulant vers le haut.	<b>16</b>
<b>Figure 2.7</b> : Schéma de Reflux circulant au milieu.	<b>17</b>
<b>Figure 2.8</b> : Schéma de Reflux circulant vers le bas.	<b>17</b>
<b>Figure 2.9</b> : Schéma de la colonne de distillation sous vide.	<b>18</b>
<b>Figure 2.10</b> : Schéma de la section de stabilisation des essences.	<b>19</b>
<b>Figure 2.11</b> : Schéma de la section de dépropaniseur T103.	<b>20</b>
<b>Figure 2.12</b> : Schéma de la section de séchage du butane dryer package.	<b>20</b>
<b>Figure 3.1</b> : Four cylindrique à tubes verticaux.	<b>26</b>
<b>Figure 3.2</b> : Four cabine à tubes horizontaux.	<b>26</b>
<b>Figure 3.3</b> : Four à convection naturelle.	<b>26</b>
<b>Figure 3.4</b> : Four à convection forcée.	<b>26</b>

<b>Figure 3.5</b> : Four à bruleur vertical sur la sole.	<b>27</b>
<b>Figure 3.6</b> : Four à deux bruleurs horizontaux.	<b>27</b>
<b>Figure 3.7</b> : Garnissage isolant et réfractaire.	<b>28</b>
<b>Figure 3.8</b> : Brûleur à prémélange type.	<b>29</b>
<b>Figure 3.9</b> : Préchauffeur d'air.	<b>30</b>
<b>Figure 3.10</b> : Réchauffeur d'air intégré.	<b>31</b>
<b>Figure 3.11</b> : Réchauffeur d'air séparé.	<b>31</b>
<b>Figure 4.1</b> : Trois fours d'une cheminée commune avec un APH.	<b>32</b>
<b>Figure 4.2</b> : Types des pertes de chaleur dans le four.	<b>33</b>
<b>Figure 4.3</b> : Quantité de chaleur fournie par les trois fours avec et sans APH.	<b>39</b>
<b>Figure 4.4</b> : Quantité de chaleur perdue par les fumées avec APH (kcal/h).	<b>57</b>
<b>Figure 4.5</b> : Quantité de chaleur perdue par les fumées sans APH (kcal/h).	<b>60</b>
<b>Figure 4.6</b> : Quantité de chaleur perdue par les fumées avec et sans APH dans les trois fours (kcal/h).	<b>61</b>
<b>Figure 4.7</b> : Quantité de chaleur perdue par les parois dans les trois fours avec et sans APH.	<b>63</b>
<b>Figure 4.8</b> : Les rendements thermiques de chaque four.	<b>65</b>

## Liste des tableaux

Tableau	Pages
<b>Tableau 1.1:</b> Caractéristiques de la charge.	<b>4</b>
<b>Tableau 1.2:</b> Spécifications du Naphta.	<b>7</b>
<b>Tableau 1.3:</b> Spécifications du kérosène.	<b>8</b>
<b>Tableau 1.4 :</b> Spécifications du Butane.	<b>9</b>
<b>Tableau 1.5:</b> Spécifications du LGO.	<b>9</b>
<b>Tableau 1.6:</b> Spécifications du HGO.	<b>10</b>
<b>Tableau 3.1:</b> Les réactions de combustion.	<b>24</b>
<b>Tableau 4.1:</b> Four F-101 rebouilleur de la colonne de préfractionnement.	<b>35</b>
<b>Tableau 4.2:</b> Four F-102 préchauffeur de la colonne de distillation atmosphérique 100-T-103.	<b>35</b>
<b>Tableau 4.3:</b> Four F-103 : rebouilleur de la colonne de distillation atmosphérique 100-T-103.	<b>36</b>
<b>Tableau 4.4:</b> Les pourcentages volumiques des constituants du gaz de combustion.	<b>36</b>
<b>Tableau 4.5:</b> PCI des constituants du gaz de combustion.	<b>37</b>
<b>Tableau 4.6:</b> Valeur de quantité de chaleur fournie par la combustion.	<b>39</b>
<b>Tableau 4.7:</b> Les valeurs de composition théorique des fumées	<b>42</b>
<b>Tableau 4.8:</b> Les quantités des constituants des fumées.	<b>44</b>
<b>Tableau 4.9:</b> Les valeurs des constituants des fumées de la combustion réelle.	<b>45</b>
<b>Tableau 4.10:</b> Les compositions réelles des fumées dans le Four 100-F-101.	<b>45</b>
<b>Tableau 4.11:</b> Les compositions réelles des fumées dans le Four 100-F-102	<b>46</b>
<b>Tableau 4.12:</b> Les compositions réelles des fumées dans le Four 100-F-103	<b>47</b>
<b>Tableau 4.13:</b> Les débits molaires des fumées.	<b>50</b>
<b>Tableau 4.14:</b> Quantité de chaleur perdue par les fumées du Four F101 avec APH.	<b>54</b>

<b>Tableau 4.15:</b> Quantité de chaleur perdue par les fumées du Four F102 avec APH.	<b>55</b>
<b>Tableau 4.16:</b> Quantité de chaleur perdue par les fumées du Four F103 avec APH.	<b>56</b>
<b>Tableau 4.17:</b> Quantité de chaleur perdue par les fumées dans les trois fours avec APH.	<b>56</b>
<b>Tableau 4.18:</b> Quantité de chaleur perdue par les fumées du Four F101 sans APH.	<b>57</b>
<b>Tableau 4.19:</b> Quantité de chaleur perdue par les fumées du Four F102 sans APH.	<b>58</b>
<b>Tableau 4.20:</b> Quantité de chaleur perdue par les fumées du Four F103 sans APH.	<b>59</b>
<b>Tableau 4.21:</b> Quantité de chaleur perdue par les fumées dans les trois fours sans APH.	<b>60</b>
<b>Tableau 4.22:</b> Tableau récapitulatif des valeurs de la quantité de chaleur perdue par les fumées.	<b>60</b>
<b>Tableau 4.23:</b> Quantité de chaleur perdue par les parois dans les trois fours avec et sans APH.	<b>63</b>
<b>Tableau 4.24:</b> Les valeurs du rendement thermique de chaque four.	<b>64</b>

## Liste des abréviations

<b>RA2K:</b>	Complexe topping condensât Skikda.
<b>GPL :</b>	Gaz de Pétrole Liquéfié.
<b>OPEP :</b>	Organisation des pays exportateurs de pétrole.
<b>Z :</b>	Profondeur.
<b>Ppm :</b>	Partie par million.
<b>KOH :</b>	L'Hydroxyde de potassium.
<b>ASTM:</b>	American Society for Testing and Materials.
<b>API:</b>	American Petroleum Institute.
<b>OB#1 :</b>	Nom d'un champ du condensât dans le désert Algérien.
<b>ALRAR :</b>	Nom d'un champ du condensât dans le désert Algérien.
<b>BEJAIA :</b>	Nom d'un champ du condensât en Algérie.
<b>LGO:</b>	Light Gas Oil (Gasoil Léger).
<b>HGO:</b>	Heavy gas oil (Gasoil lourd).
<b>Ppb :</b>	Partie par milliard.
<b>Max :</b>	Maximum.
<b>Min :</b>	Minimum.
<b>CSt :</b>	Centistokes $1cSt = 1mm^2$ .
<b>PS/m :</b>	Picosiémens par mètre.
<b>U :</b>	Unité.
<b>RHOUD NOUSS :</b>	Nom d'un champ de condensât dans le désert Algérien.
<b>NEW OB1 :</b>	Nom d'un champ de condensât dans le désert Algérien.
<b>Jet A1:</b>	Carburant pour aviation (Kérosène).
<b>R :</b>	Le taux de reflux.

---

<b>APH:</b>	Air prehaiter (préchauffeurs d'air).
<b>PCI :</b>	Pouvoir calorifique inférieur.
<b>PCS :</b>	Pouvoir calorifique supérieur.
<b><math>\eta</math> :</b>	Rendement Thermique.
<b>F101 :</b>	Four F-101 rebouilleur de la colonne de préfractionnement.
<b>F102 :</b>	Four F-102 préchauffeur de la colonne de distillation atmosphérique 100-T-103.
<b>F103 :</b>	Four F-103 : rebouilleur de la colonne de distillation atmosphérique 100-T-103.
<b>Q :</b>	Quantité de chaleur.
<b>T :</b>	Température.
<b><math>y_i</math> :</b>	Fraction volumique.
<b><math>\beta</math>:</b>	Volume d'excès d'air.
<b>n :</b>	Débit molaire.
<b>DA :</b>	Dinar Algérien.
<b>NO<sub>x</sub> :</b>	Oxyde d'azote.



# *Introduction générale*



## Introduction générale

A la fin de la formation de notre master, nous avons effectué un stage à Sonatrach afin d'acquérir l'expérience nécessaire pour entrer dans le monde du travail et des travaux techniques et faire face à la réalité quotidienne de la vie professionnelle, construire notre personnalité technique et aussi développer et appliquer nos connaissances théoriques et pratiques sur le terrain.

Dans le complexe topping RA2K Skikda, la chaleur est source nécessaire pour le processus de raffinage de condensât et le complexe produisait de la chaleur pour la distillation ou le chauffage à travers deux processus, le premier chauffage à l'aide d'échangeurs de chaleur et la deuxième source de chaleur élevée était celle des fours pétroliers.

Le complexe RA2K contient trois fours tubulaires reliés à une cheminée commune avec un APH commun. Les fours pétroliers modernes s'appuient sur un APH utilisé, qui est chargé de réduire la température de la fumée du processus de combustion d'une différence de 250 °C. Les fumées sont mélangées, à la sortie de la zone de charge thermique de chaque four, et refroidies dans l'APH avant d'être déchargées par la cheminée dans l'atmosphère à l'aide des ventilateurs d'extracteur. L'air de combustion est inséré par deux ventilateurs dans l'air avant le chauffage, puis envoyé aux flammes après chauffage.

Dans le présent travail, nous avons fait une étude détaillée sur les fours installés au niveau de la Raffinerie de Skikda. Nous nous sommes principalement intéressés : à l'étude du rendement. Énergétique des trois fours tubulaires et de la façon d'augmentation de leur rendement énergétique après le fonctionnement d'un préchauffeur d'air ; au calcul des quantités de chaleur perdues par les fumées, par les parois et la chaleur fournie par la combustion réelle de gaz naturel afin de réduire le coût économique du raffinage. Le mémoire résultant de cette étude est divisé en quatre chapitres :

- ✚ Le chapitre 1: Dans ce chapitre, nous aborderons la définition et l'étude de la matière première que le complexe affine, ainsi que les produits du condensât qui résultent du raffinage et leurs caractéristiques.

- ✚ Le chapitre 2: Dans ce chapitre, nous présenterons la raffinerie de condensât RA2K Skikda, nous décrirons l'unité U100 qui représente l'objectif de notre étude, et nous identifierons aussi les différentes installations qui composent cette unité tout en expliquant la fonction de chacune d'elles.
- ✚ Le chapitre 3: Nous pourrions dire que ce chapitre est le cœur de notre étude, il sera consacré à la description de la méthode de base de production de chaleur qui est l'étude des fours à pétrole et à leur structure de base et leur mode de fonctionnement. Nous y aborderons essentiellement la partie la plus importante de la structure du four qui est l'APH.
- ✚ Le chapitre 4: Dans ce chapitre nous exposerons l'étude pratique relative au calcul de la chaleur perdue et fournie par les trois fours ainsi que leur rendement thermique dans l'unité de distillation, nous comparerons le rendement des trois fours en présence et en absence de l'APH et nous déterminerons le gain d'énergie apporté par l'utilisation du préchauffeur d'air (APH) ainsi que la réduction des émissions de gaz à l'effet de serre.



*Chapitre 01:*  
*Généralités Sur*  
*Le Condensât*



## 1.1 Introduction

Le raffinage du pétrole est une industrie lourde qui transforme un mélange d'hydrocarbures, appelé pétrole brut ou condensât du gaz naturel, en produits énergétiques, tels que carburant et combustibles, et en produits non énergétiques, tels que matières premières pétrochimiques, lubrifiants, paraffines et bitumes. Les produits sont ensuite acheminés vers le consommateur final, soit directement, soit à travers un réseau de distribution comprenant notamment des dépôts et des stations-service. La transformation des pétroles bruts s'effectue dans les raffineries, usines à feux continus et très automatisées, qui sont plus ou moins complexes selon la gamme des produits fabriqués et selon la qualité des pétroles bruts comparée aux exigences du marché [1].

## 1.2 Le condensât

### 1.2.1 Définition du condensât

Le condensât, est un type de brut dans lequel une proportion de gaz a une faible densité par rapport au brut ordinaire, comme ce qui est utilisé dans RA2K à Skikda où cette raffinerie est dédiée au traitement du condensât. Les condensâtes sont parfois appelés « liquides de puits de gaz naturel ». Ils font partie des « liquides de gaz naturel » qui incluent généralement aussi les gaz de pétrole liquéfiés (GPL) dans les diverses classifications. Précisons que les condensâtes de gaz naturel sont souvent comptabilisés avec le pétrole brut dans les bilans de production nationaux sauf dans les pays de l'OPEP [2]. Le condensât est constitué d'un mélange d'hydrocarbures paraffiniques, jusqu'au ( $C_{12}H_{26}$ ) et plus, généralement extrait des gisements du gaz à condensât [3].

### 1.2.2 Gisements de gaz à condensât

Un gisement de gaz à condensât est un gisement qui contient un complexe hydrocarbure tel que, par abaissement de la pression, une partie liquide appelée condensât se dépose dans le gisement. La production de gaz sera elle-même accompagnée d'une proportion importante de condensât, qui est une huile légère très demandée sur le marché. Ces gisements sont généralement assez profonds ( $Z > 2000m$ ) [4].

### 1.2.3 Gaz à condensât

Dans le cas d'un gaz à condensât, une phase liquide peut se former dans le réservoir par condensation rétrograde [5].

## 1.2.4 Caractéristiques du Condensât

Les principales caractéristiques du condensât sont :

- ✚ **Aspect** : C'est un liquide incolore, avec une odeur d'essence.
- ✚ **Point d'éclair** : Son point d'éclair est inférieur à  $-40^{\circ}\text{C}$ .
- ✚ **Limites d'inflammabilités** : Il est très inflammable, car il a un point d'éclair inférieur à zéro, ses limites d'inflammabilités sont approximativement : 1,4 et 7,6% (dans l'air).
- ✚ **Toxicité physiologique** : Les vapeurs du condensât sont toxiques. Lorsqu'un Homme s'y expose le premier symptôme constaté sera l'irritation des yeux ce qui sera suivie de symptômes névropathiques (étourdissement).
- ✚ **Précautions hygiéniques** : Pour prévenir l'intoxication, on doit réaliser une ventilation convenable des locaux de travail et maintenir la concentration des vapeurs du condensât à moins de 300 ppm [6].
- ✚ **Densité de vapeur** : Les vapeurs du condensât sont plus lourdes que l'air, la densité de ces vapeurs est de 3 à 4 plus grande que celle de l'air [7].

## 1.2.5 Caractéristiques de la charge du TOPPING

Les caractéristiques principales de la charge sont indiquées dans le tableau (1.1) :

**Tableau 1.1:** Caractéristiques de la charge [8].

Mode opératoire	Unité	OB#1	D'ALRAR	BEJAIA
Débit	1000 kg/h	631,31	631,31	631,31
Densité à $15^{\circ}\text{C}$	$\text{kg}/\text{m}^3$	709,7	713,2	713,3
Densité API	/	67,7	66,7	66,7
Teneur en soufre	mg /kg	12,0	11,0	31,0
Point d'éclair	$^{\circ}\text{C}$	<-5	<-5	<-5
Acidité totale	mg KOH/g	0,4066	0,0137	0,0186

## 1.2.6 Applications du Condensât

Il existe plusieurs applications et utilisations du condensât dans l'industrie pétrochimique, dont les plus importantes sont les suivantes :

## 1.2.6.1 Application dans la pétrochimie

La valorisation du condensât, se fait principalement dans le domaine de la pétrochimie où la demande est très importante, il est principalement utilisé pour la production des oléfines par le vapocraquage [3].

## 1.2.6.2 Application dans le raffinage

Le condensât est utilisé dans la production des carburants notamment les essences, leurs prix de revient est plus bas que les essences produites à partir du pétrole brut car la séparation et la transformation du condensât sont moins coûteuses, et sa composition chimique est riche en éléments légers [6].

Il est utilisé aussi dans le procédé d'isomérisation pour produire l'essence « isomérisation », en transformant les normales paraffines en iso-paraffines qui ont un haut indice d'octane utilisé également dans le reforming catalytique [7].

## 1.3 Principaux produits issus de condensât Algérien

En général, les produits qui dictent la conception des raffineries sont relativement peu nombreux, et les procédés de base des raffineries sont basés sur les produits à grande quantité tels que l'essence, le diesel, le carburéacteur et les huiles de chauffage domestique.

La connaissance des propriétés physiques et chimiques des produits pétroliers est nécessaire pour comprendre la nécessité des divers procédés de raffinerie [9]. Le raffinage du condensât dans l'unité RA2K peut donner lieu aux coupes pétrolières représentées dans le schéma suivant :

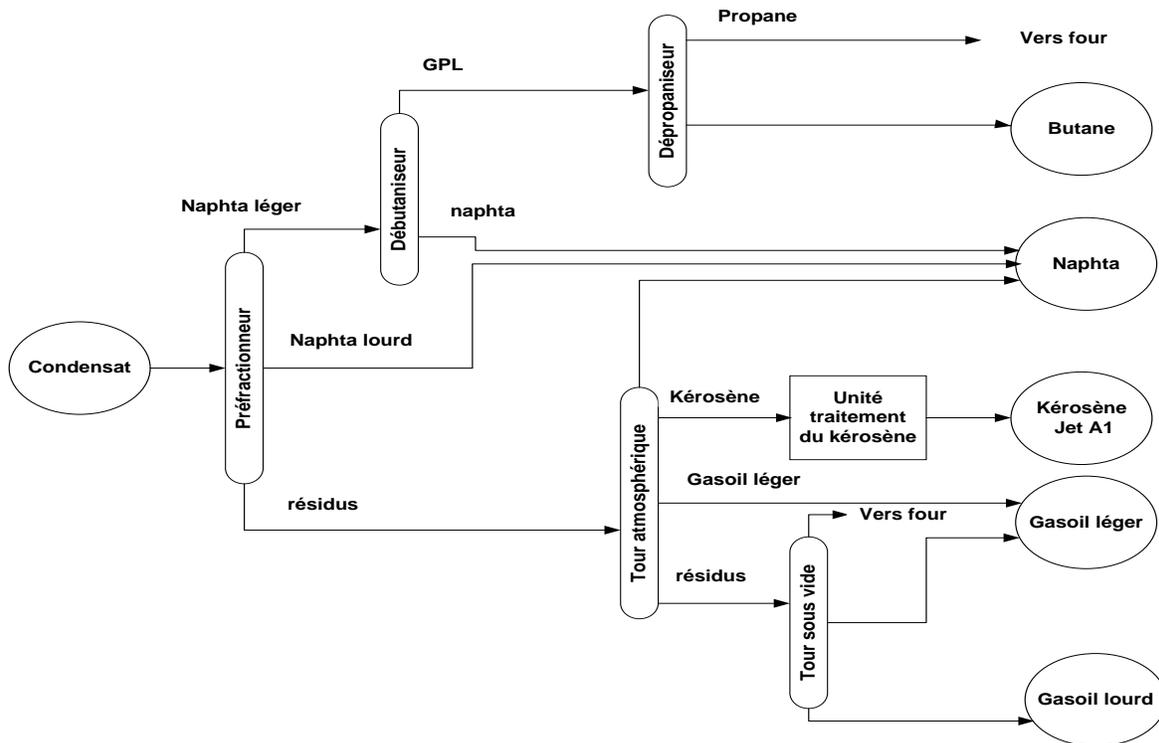


Figure 1.1 : Schéma synoptique des coupes pétrolières de Condensât [10].

## 1.3.1 Le Naphta

### 1.3.1.1 Définition du Naphta

Le naphta de pétrole est un liquide transparent, flux intermédiaire d'hydrocarbures dérivé du raffinage du pétrole brut il est le plus souvent désulfuré puis catalytiquement réformé. Naphta est un terme général, sur terrain chaque raffinerie produit ses propres naphthas avec leurs propres points d'ébullition initiale et finale et d'autres caractéristiques physiques et compositionnelles [11,12].

### 1.3.1.2 Les différents types de naphta

- le naphta léger** de point final 80 °C ou 100 °C (point final = température finale de distillation) ; sa température initiale de distillation pouvant descendre en dessous de 42 °C, le liquide peut s'évaporer partiellement s'il est conservé dans un réservoir avec évent à pression atmosphérique dans les pays chauds comme l'Inde.
- le naphta lourd** de point initial 80 °C à 100 °C et le point final 150 °C à 220 °C.
- le naphta total** qui est la somme des deux premiers [12].

### 1.3.1.3 Caractéristiques des naphtas

Les naphtas constituent une catégorie particulière de solvants hydrocarburés et constituent une classe assez homogène. Deux types d'exigences sont formulés lors des contrats de fournitures de naphtas : elles concernent la composition et la teneur en impuretés définies [13].

### 1.3.1.4 Spécifications du Naphta de RA2K

Tableau 1.2: Spécifications du Naphta [8].

Analyses	Unité	NORME	LIMITES
Densité à 15°C	Kg/m <sup>3</sup>	ASTM D4052	680,0 – 720,0
Teneur en Plomb	Ppb	ASTM D5863	≤ 50
Teneur en Mercure	Ppb	ASTM D5863	≤ 5
Teneur en Soufre	ppm	ASTM D5453	≤ 50
Paraffines	%vol	ASTM D6293	≥ 70
Oléfines	%vol		Unquantitative

## 1.3.2 Le kérosène

### 1.3.2.1 Définition du kérosène

Le kérosène, est un mélange d'hydrocarbures contenant des alcanes (C<sub>10</sub>H<sub>22</sub>), c'est un liquide inflammable d'hydrocarbures couramment utilisé comme combustible. Le kérosène est généralement jaune pâle ou incolore et a une odeur caractéristique non désagréable. Il est obtenu à partir de pétrole et est utilisé: pour la combustion dans les lampes à kérosène et les appareils de chauffage domestique ou les fours, comme un composant de carburant pour les moteurs à réaction, et comme un solvant pour les graisses et les insecticides [14,15].

Le kérosène a une température maximale de distillation de 204 °C (400 °F), un dernier point d'ébullition de 300 °C (572 °F) [16].

### 1.3.2.2 Point d'éclair du kérosène

Le point d'éclair du kérosène est de 149 degrés Fahrenheit, la température à laquelle une substance s'enflamme d'elle-même à pression normale est la température d'auto-inflammation. Cette température pour le kérosène est de 444 degrés Fahrenheit [17].

### 1.3.2.3 Le point de congélation

Le point de congélation indique précisément la température de solidification d'un liquide ou d'une substance contenant de l'eau dans des conditions données, avec un changement de pression ou de température: la congélation, la cristallisation, la gélification ou la solidification sont les inverses de l'ébullition ou la liquéfaction (Tableau 1.3) [18].

### 1.3.2.4 Spécification du kérosène de RA2K

Tableau 1.3: Spécifications du kérosène [8].

Analyses	Unité	Norme	LIMITES
Acidité Totale	mg KOH/g	ASTM D3242	0,015 max
Soufre total	% masse	ASTM D5453	0,30 max
Soufre mercaptanes	% masse	ASTM D3227	0,003 max
Densité à 15°C	Kg/m <sup>3</sup>	ASTM D4052	775,0 – 840,0
Point d'éclair	°C	ASTM D56	38,0 min
Point de congélation	°C	ASTM D2386	-47,0 max
Conductivité	Ps/m	/	50-600

### 1.3.3 Butane

#### 1.3.3.1 Définition du Butane

C'est un gaz incolore avec une faible odeur de pétrole de la formule C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, pour le transport, il est expédié sous forme de gaz liquéfié sous sa pression de vapeur. Il est facilement enflammé et ses vapeurs sont plus lourdes que l'air (Tableau 1.4), toute fuite peut être liquide ou vapeur. Sous une exposition prolongée au feu ou à la chaleur intense, les conteneurs peuvent se rompre violemment et se faire exploser [19].

## 1.3.3.2 Spécifications du Butane de RA2K

Tableau 1.4 : Spécifications du Butane [8].

Spécifications	Méthode		Valeur	Unité
C <sub>3</sub> et moins	-	≤	19	% vol
Densité à 15 °C	NA565	≥	0,559	Kg/m <sup>3</sup>
Vaporisation à 1 °C	NA8144	≥	95	% vol

## 1.3.4 LGO

### 1.3.4.1 Définition de LGO

Le pétrole léger est un liquide converti à partir de pétrole brut (dans une raffinerie de pétrole) ou de pétrole lourd (dans une usine chimique). Le pétrole léger peut être converti au gaz de pétrole, ou utilisé pour créer du combustible solide et du carburant [20].

### 1.3.4.2 Utilisation du LGO

Le gazole est très largement utilisé comme carburant automobile, dans les moteurs Diesel. Initialement largement utilisé pour les transports de marchandises et les transports en commun [21].

### 1.3.4.3 Spécifications du LGO de RA2K

Tableau (1.5): Spécifications du LGO [8].

Analyses	Unité	Norme	LIMITES
Densité à 15°C	Kg/m <sup>3</sup>	ASTM D4052	820,0 – 845,0
Viscosité à 40°C	mm <sup>2</sup> /s (cSt)	ASTM D 445	2,00-4,50
Soufre Total	mg/Kg	ASTM D5453	≤10,0
Point d'éclair	°C	ASTM D56	55,0 -120°C
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques	% masse	NF EN12916	≤ 11%
Conductivité	PS/m	NF EN ISO3170	≥150PS/m à 20°C

### 1.3.5 HGO

#### 1.3.5.1 Définition de HGO

Le mazout lourd est une fraction obtenue à partir de la distillation du condensât, soit sous forme de distillat, soit sous forme de résidu. D'une manière générale, le mazout est tout carburant liquide qui est brûlé dans un four ou une chaudière pour la production de chaleur ou utilisé dans un moteur pour la production d'énergie, en ce sens, le diesel est un type de mazout. Le mazout est fait de longues chaînes d'hydrocarbures, en particulier les alcanes, les cyclo alcanes et les aromatiques [22, 23].

#### 1.3.5.2 Spécification du HGO de RA2K

**Tableau (1.6):** Spécifications du HGO [8].

Analyse	Unité	Norme	LIMITES
Densité à 15°C	Kg/m <sup>3</sup>	ASTM D4052	820-860
Viscosité à 40°C	mm <sup>2</sup> /s (cSt)	ASTM D445	Report
SoufreTotal	% masse	ASTM D5453	≤ 0,1
Résidu de Carbone	% masse	ASTM D4530	Report
Point d'éclair	°C	ASTM D56	≥ 75°C



*Chapitre 02:*  
*Présentation*  
*générale de la*  
*raffinerie RA2K*



## 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous procéderons à la description et au fonctionnement de l'unité U100 qui représente l'objectif de notre étude et nous exposerons les différentes principales installations qui constituent cette unité.

## 2.2 Présentation générale de la raffinerie de Topping condensât RA2K

La raffinerie Topping est de capacité de traitement de 5 millions de tonnes de condensât par an, issu des champs pétroliers Algériens en vue de produire le Butane, le Naphta, le Kérosène, le Gasoil léger et le Gasoil lourd [24].

## 2.3 Historique de la raffinerie (RA2K)

SONATRACH avait projeté de réaliser l'usine de Topping condensât en partenariat et avait lancé deux appels d'offre, le premier pour la recherche d'un partenaire et le second pour la réalisation de l'usine. Le 10 Mai 2005 China National Petroleum Corporation (CNPC) avait décroché le contrat pour la réalisation de la raffinerie de Topping de condensât de Skikda [24].

## 2.4 Localisation géographique

Le Complexe Topping de Condensât RA2K est situé dans l'enceinte, Zone Industrielle de Skikda, à l'Est de la ville de Skikda, en dehors du tissu urbain, dans le périmètre de l'ancien aéroport (Figure 2.1). Il s'étend sur une superficie d'environ 45 hectares et comprend les unités de production, les différentes utilités, les zones de réception de la matière première, de stockage et de transfert des produits finis [10].

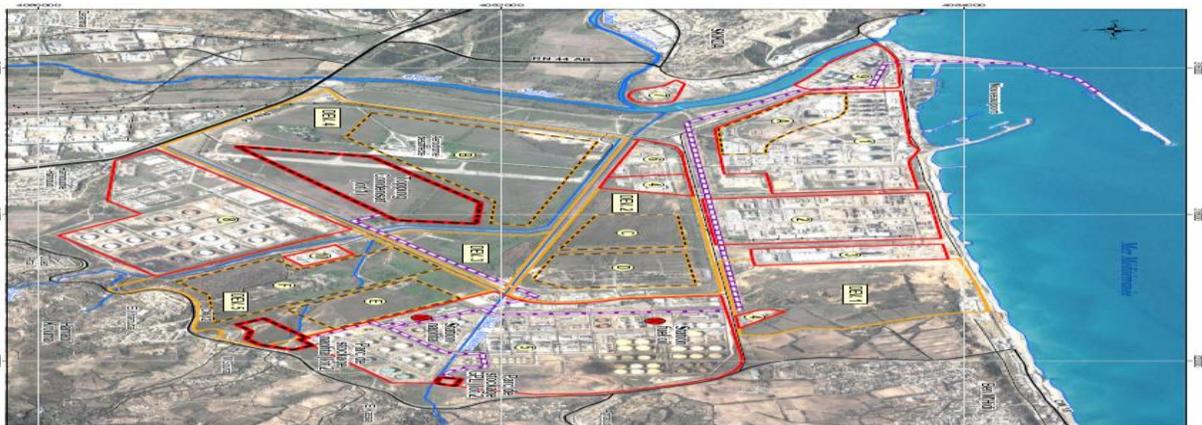


Figure 2.1 : Plan de situation du complexe RA2k.

### 2.5 Conception Générale du Complexe

Ce complexe est conçu pour le traitement de cinq types de charges de condensât nommés comme suit: OB1, ALRAR, BEJAIA, RHOUD NOUSS, NEW OB1 et comprend plusieurs unités et installations de traitement à savoir [25] :

#### 2.5.1 Unité Topping de Condensât (Unité-100)

L'unité de traitement est constituée des différentes sections suivantes:

Distillation du Condensât, Stabilisation du Naphta, Dépropanisations et Séchage de butane [10].

#### 2.5.2 Unité de traitement du kérosène (U200)

Dans cette unité le kérosène provenant de la distillation du condensât est traité pour en faire du Jet A1.

Le traitement du kérosène se fait selon les étapes suivantes:

- ✚ Mélange avec de la soude caustique (4% en poids).
- ✚ Enlèvement des acides naphthéniques à l'aide d'un procédé de précipitation par électrofinage (Electrofining Precipitator).
- ✚ Enlèvement d'eau et d'impuretés à l'aide d'un filtre et d'un coalesceur.
- ✚ Enlèvement d'impuretés à l'aide d'un filtre et d'une tour d'argile [10].
- ✚ Préparation et stockage soude caustique/acide, ainsi le transfert [26].

#### 2.5.3 Installations de stockage et de transfert des Produits Finis (U300)

Dispose d'installations pour recevoir, stocker et pomper le condensât, le naphta, le kérosène/jet A1, le gasoil léger, le gasoil lourd, et butane/Propane [8].

#### 2.5.4 Système torche (U400)

A été fourni dans le complexe pour éliminer sans risque toute perturbation sur les unités de traitement/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 [8].

## 2.5.5 Les utilités (U500)

Les principales utilités requises pour la mise en exploitation du complexe sont le gaz naturel, l'azote, l'électricité, l'eau industrielle, la vapeur et l'air comprimé [10].

## 2.6 Fonctionnement de l'unité 100

Les équipements principaux de cette unité sont: Train de préchauffeur, Préfractionneur, Tour de Distillation Atmosphérique, Débutaniseur, Dépropaniseur, Sécheur de butane ...etc.

### 2.6.1 Train de préchauffeur

La charge est pompée aux installations de l'unité Topping de Condensât à une pression de 20 bars et une température de 30°C. Le Condensât est ensuite chauffé dans un train d'échangeurs de préchauffage avant d'entrer au préfractionneur (colonne de pré-distillation T101) (Figure 2.2) [24].

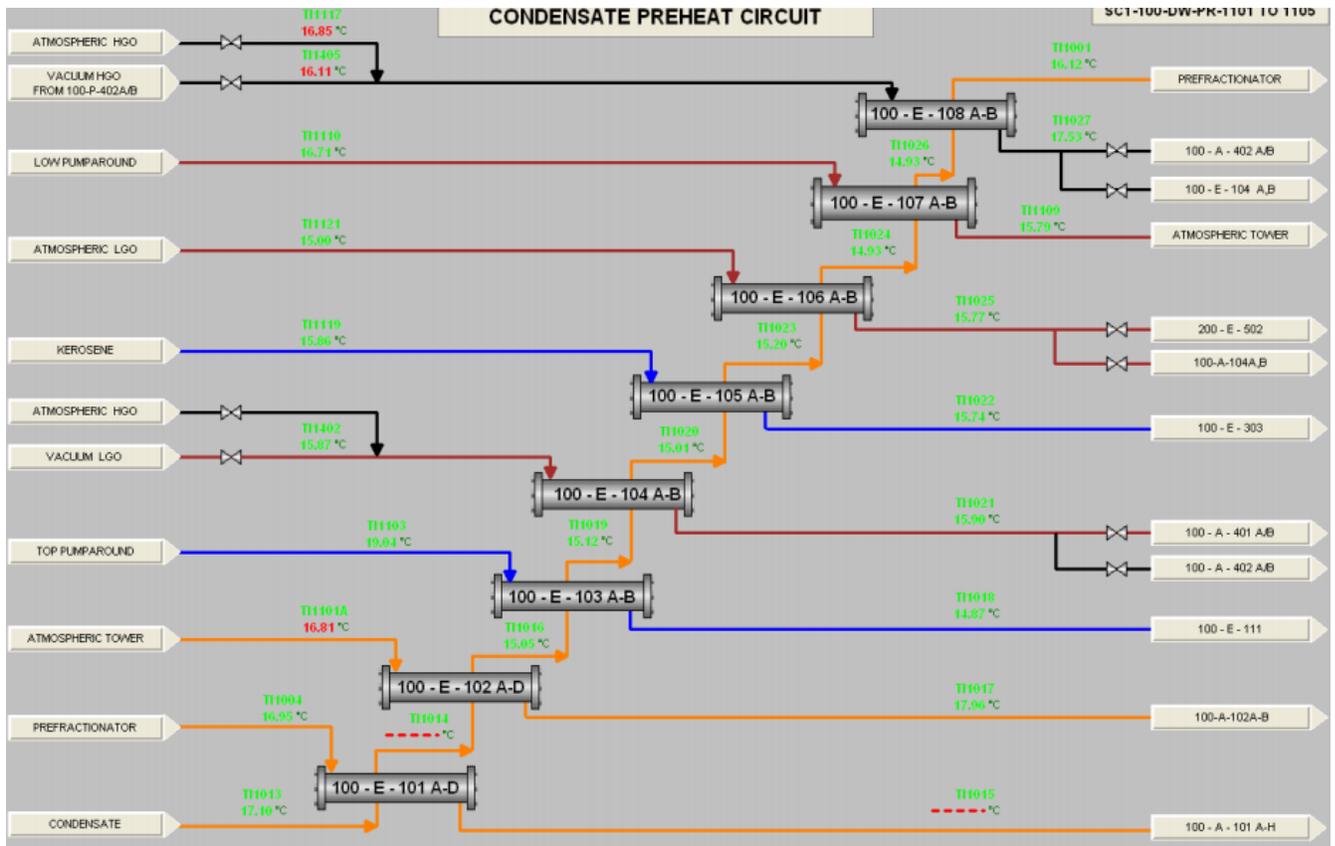


Figure 2.2: Schéma de la section de préchauffeur.

## 2.6.2 Distillation

La distillation du condensât comprend deux procédés distincts : la distillation atmosphérique et la distillation sous vide [27].

### 2.6.2.1 Préfractionnement (Figure 2.3)

La colonne T-101 (préfractionneur) a pour but de préfractionner le condensât en trois produits: Coupe de tête (gaz et naphtha) ; Coupe latérale (naphtha stable.); Coupe de fond (condensât stable).

La colonne est conçue avec un ensemble de 35 plateaux, et reçoit le condensât partiellement vaporisé au plateau numéro 28 [26].

La température d'entrée du condensât dans la colonne de préfractionnement est de l'ordre 136°C ; ainsi réellement ; elle est d'ordre : 126°C-128°C à taux de marche 100% [25].

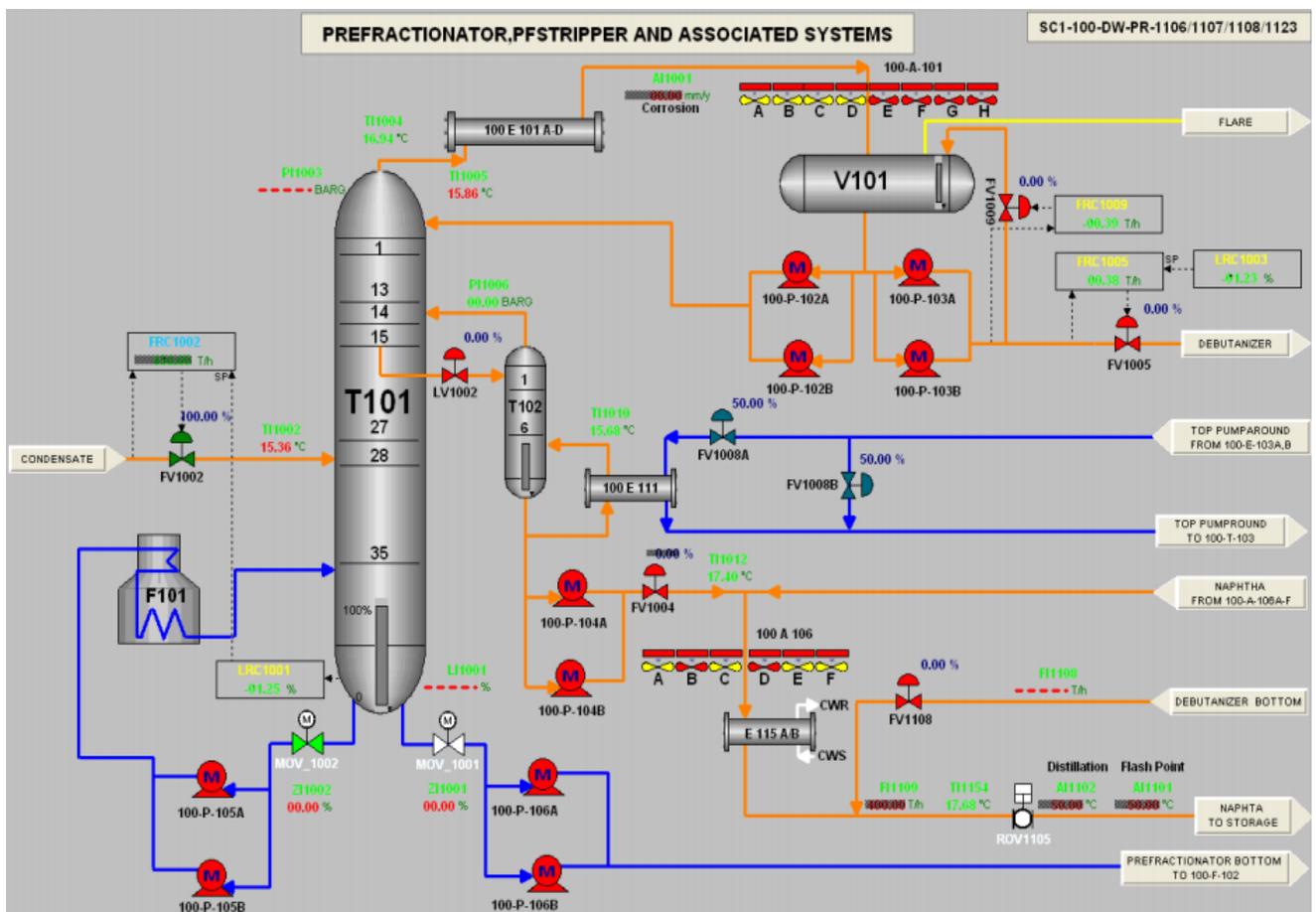


Figure 2.3: Schéma de la section de préfractionnement.



### ✚ Stripper de Kérosène

La fraction de kérosène, sous contrôle de niveau, est soutirée des plateaux 22 et 21 de la colonne de distillation atmosphérique vers le stripper de Kérosène 100-T-104. Il est équipé de 8 plateaux et un rebouilleur thermosiphon 100-E-109 (Rebouilleur de Kérosène). La chaleur nécessaire pour le strippage du kérosène dans le 100-E-109 est fournie par le recyclage du HGO du fond de la colonne atmosphérique. La chaleur est contrôlée par une vanne de régulation à 3 voies [8].

### ✚ Stripper de LGO

La coupe de LGO, sous contrôle de niveau, est soutirée du plateau 32 de la colonne de distillation atmosphérique vers le stripper de LGO (100-T-105). Le stripper de LGO (100-T-105) est équipé de 6 plateaux et un rebouilleur thermosiphon 100-E-110 (Rebouilleur de LGO) [8].

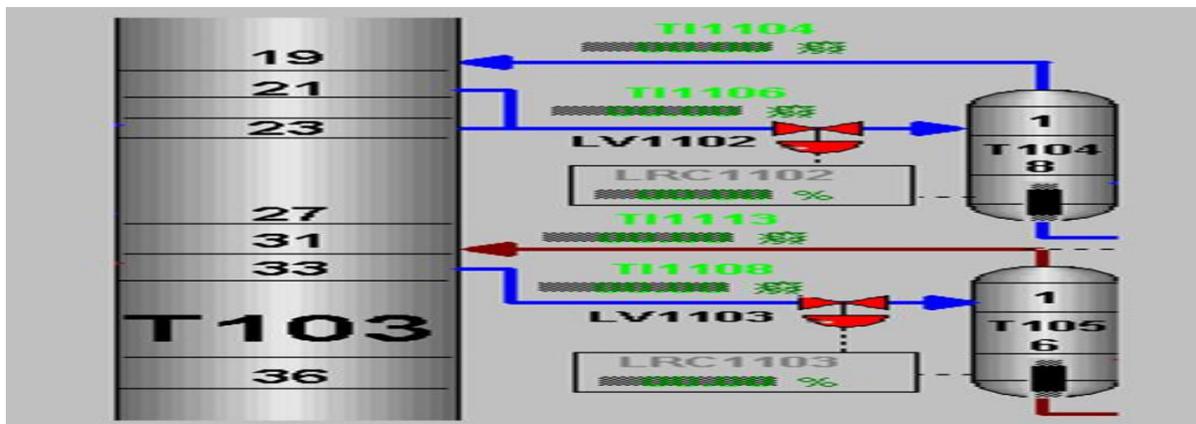


Figure 2.5 : Schéma de deux colonnes de stripping.

### b) Reflux de la colonne atmosphérique

Le reflux définit le terme utilisé pour désigner le mouvement de retour d'un courant de fluide et, en particulier, de la fraction de distillat qui, dans la rectification, est envoyée à nouveau, après condensation, dans la colonne. Le taux de reflux  $R$  exprime donc le pourcentage de liquide ramené en tant que reflux au produit à éliminer ou encore le rapport du reflux descendant aux vapeurs montantes dans la colonne [30].

La colonne de distillation atmosphérique T-103 contient trois reflux circulants sont :

### 1) Reflux circulant haut T-103 (Figure 2.6)

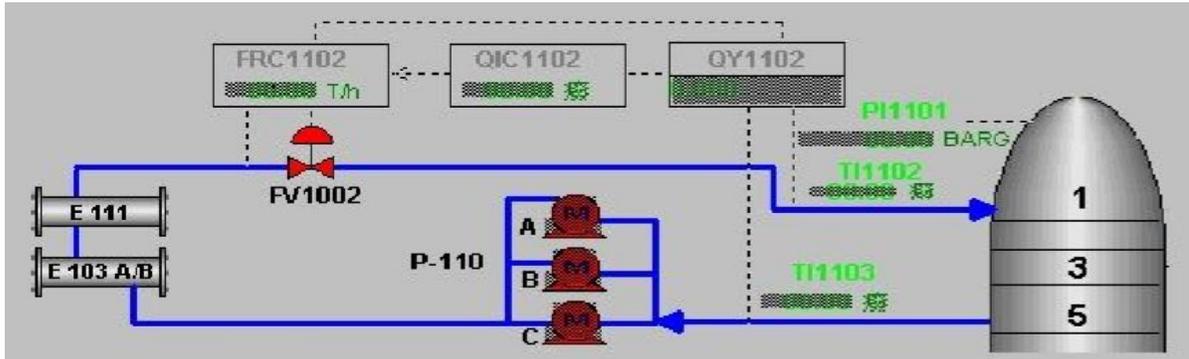


Figure 2.6 : Schéma Reflux circulant haut.

### 2) Reflux circulant milieu T-103 (Figure 2.7)

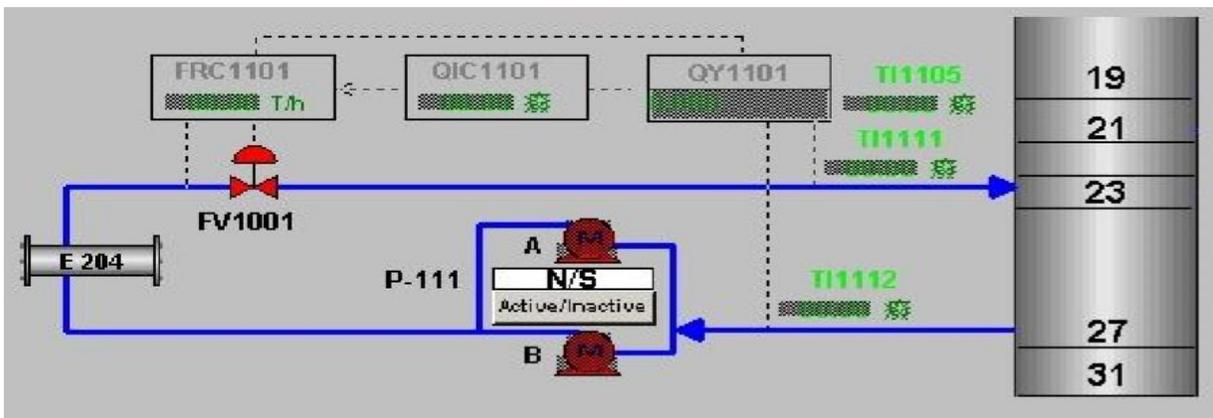


Figure 2.7 : Schéma Reflux circulant milieu.

### 3) Reflux circulant bas T-103 (Figure 2.8)

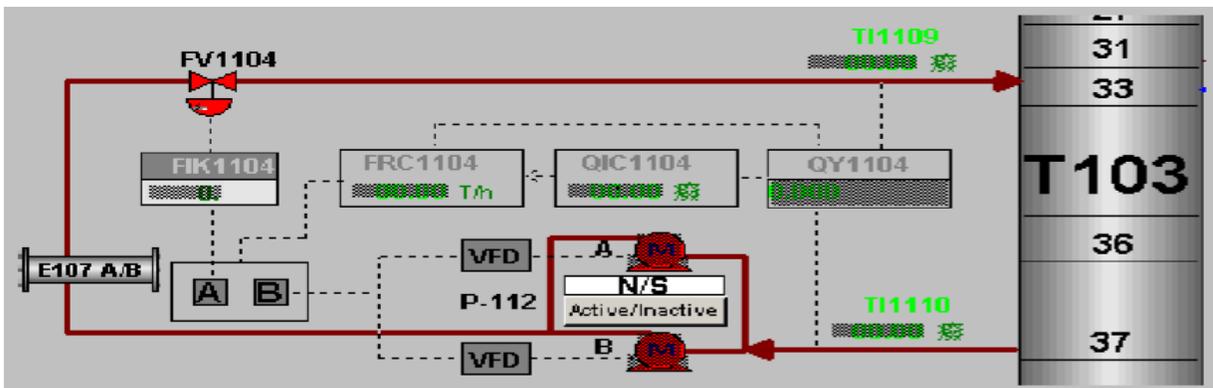


Figure 2.8 : Schéma Reflux circulant bas.

### 2.6.2.3 Distillation sous vide

L'opération consiste à séparer, sur le même principe que la distillation atmosphérique, les produits lourds des résidus de produits moyens en les soumettant à une deuxième phase de distillation dite « sous vide ». Une colonne plus petite est fermée puis dépressurisée. Cette chute de pression permet de récupérer plus facilement les produits lourds dont la température d'ébullition est abaissée. Les résidus de cette distillation sous vide sont récupérés en vue de produire des lubrifiants [31].

La Figure ci-dessous représente un schéma détaillé de la distillation sous vide :

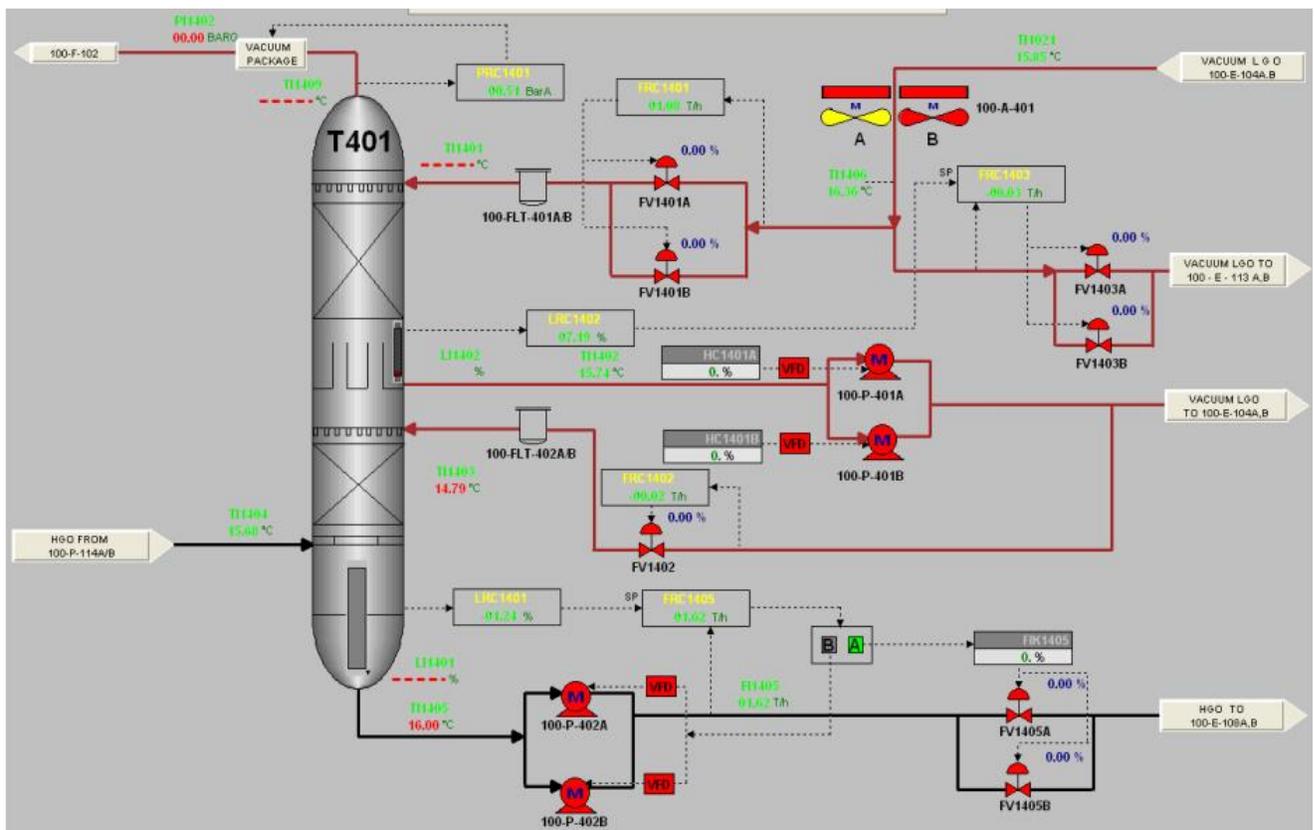


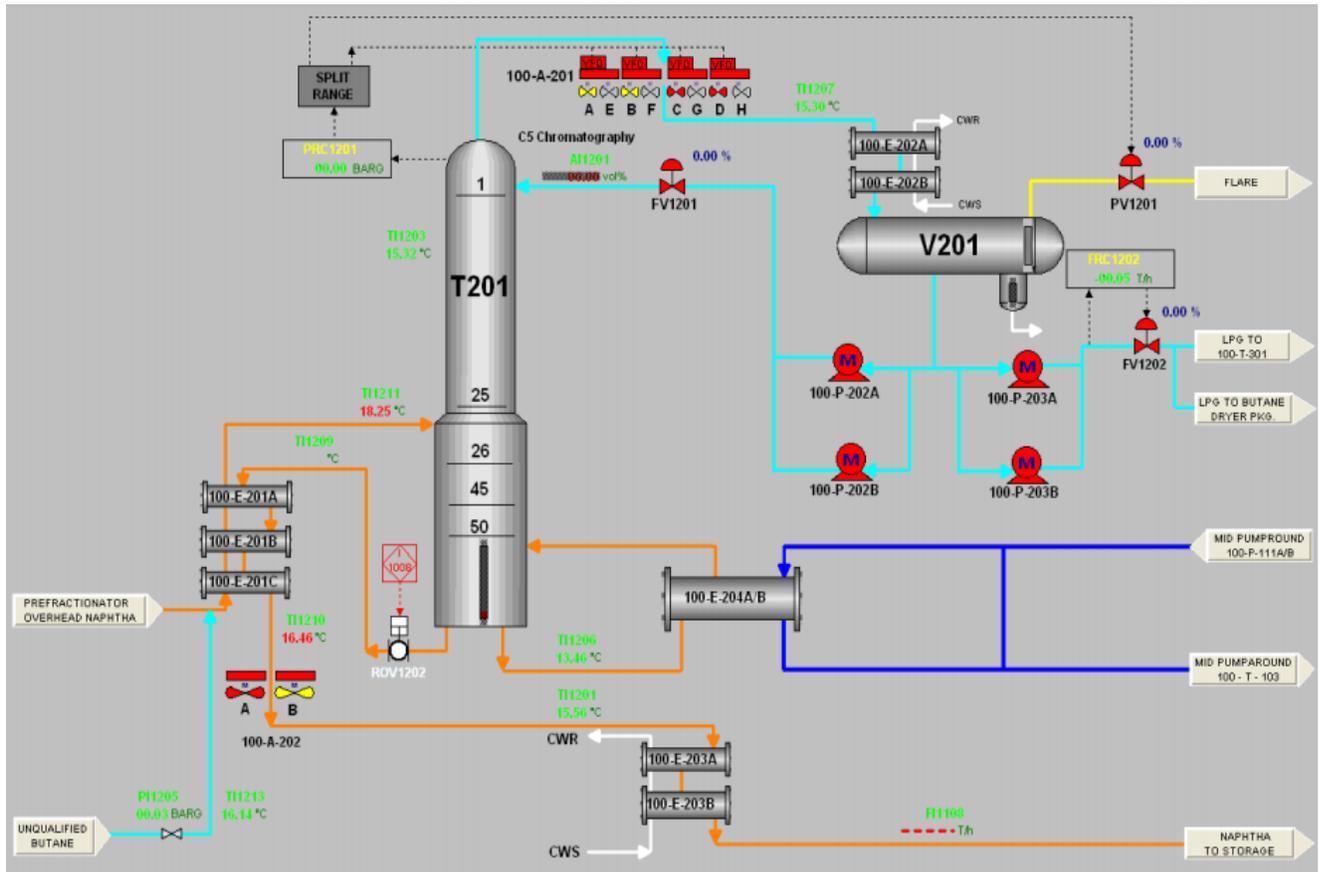
Figure 2.9 : Schéma de la colonne de distillation sous vide.

### 2.6.3 Stabilisation des essences

Cette étape est assurée par la colonne T-201 appelée débutaniseur ou colonne de stabilisation, qui nous donne deux produits (Figure 2.10):

- ✚ En tête, la coupe Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) ;
- ✚ Au fond, la coupe essence dite “stabilisée”.

La colonne est équipée de 50 plateaux, et l’alimentation est effectuée au plateau numéro 26 [26].



**Figure 2.10:** Schéma de la section de stabilisation des essences.

## 2.6.4 Section de Dépropaniseur

Le Dépropaniseur est conçu pour séparer le GPL brut en Butane et Propane contenant un peu d’Ethane (Figure 2.11). Le Propane est envoyé au four en tant que Gaz combustible et le Butane est envoyé au stockage ou au Dispositif de Séchage de Butane 100-PKG-301 pour le séchage, et est ensuite acheminé au stockage en tant que produit [8].

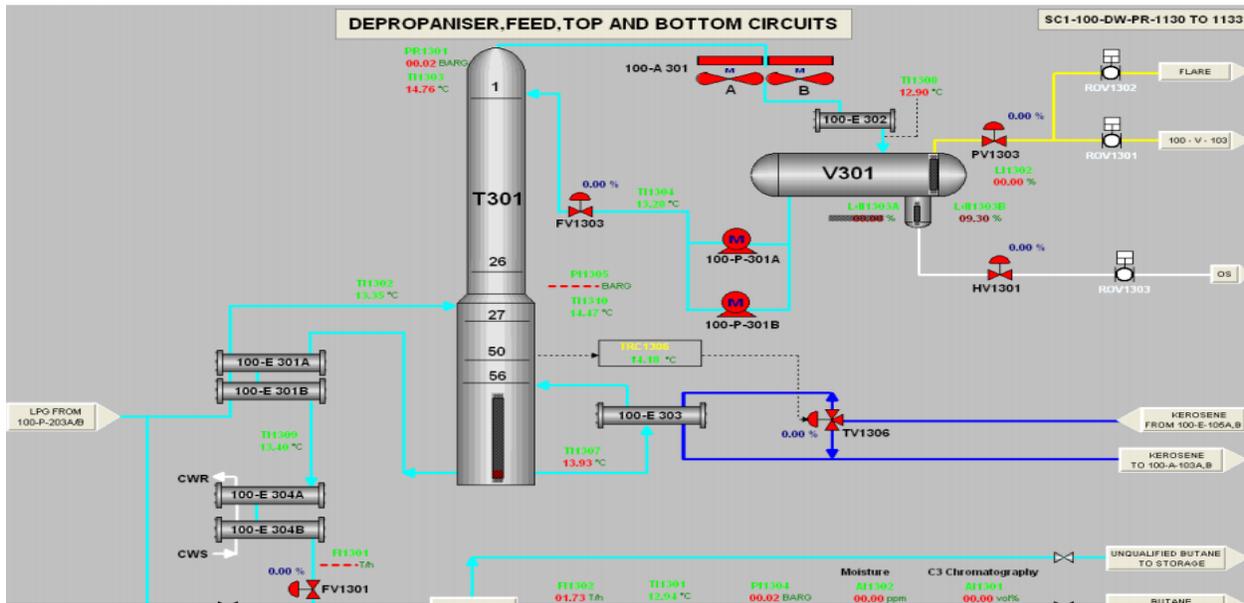


Figure 2.11 : Schéma de la section de Dépropaniser T103.

### 2.6.5 Section de séchage de butane

L'objectif de cette étape est de sécher le butane jusqu'à 20 ppm. Le système de séchage de butane contient deux colonnes à tamis moléculaire, une est utilisée pour le séchage et l'autre pour la régénération (Figure 2.12), le butane humide est dirigé vers le haut par la tour de séchage, où le tamis moléculaire absorbe l'eau y existante [26].

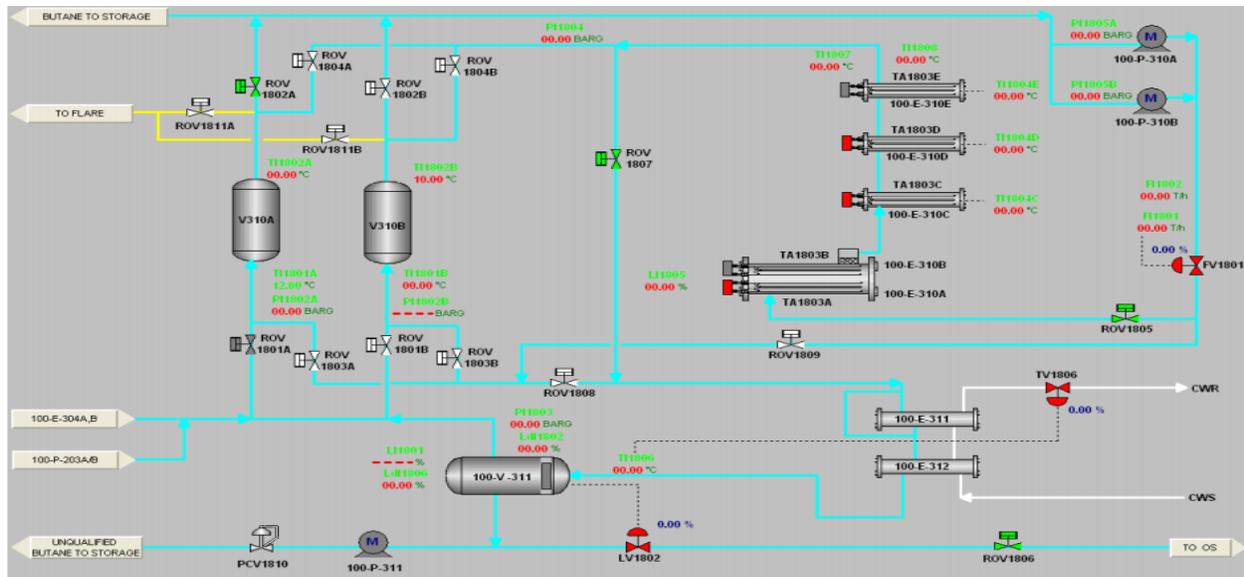


Figure 2.12: Schéma de la section de séchage du butane dryer package.



*Chapitre 03:*  
*Les Fours Tubulaires*



## 3.1 Introduction

Dans la plupart des installations de raffinerie ou de pétrochimie, l'apport des calories nécessaires au procédé mis en œuvre se fait par l'intermédiaire d'un four à chauffage direct dans lequel les calories produites par la combustion sont transmises par les mécanismes de la radiation, de la conduction et de la convection au fluide à chauffer qui circule dans un serpentин tubulaire ou un faisceau de tubes, d'où le nom « fours tubulaires » que l'on donne à ce type d'appareils. Les usages de ces fours sont multiples mais chaque cas nécessite une étude particulière dans le but de concevoir le four le plus économique et le mieux adapté aux conditions imposées [32].

L'objet de ce chapitre est l'étude théorique du four, de son fonctionnement et l'identification de ses caractéristiques les plus importantes. Nous aborderons également la chose la plus importante dans notre mémoire c'est l'APH, que nous considérons comme la pièce la plus importante dans les fours tubulaires.

## 3.2 Théorie de transfert de chaleur

La plupart des procédés et des équipements utilisés dans l'industrie pétrochimique dépendent fortement de l'énergie thermique et de l'échange de chaleur.

### 3.2.1 Définition

Un transfert thermique est un transfert d'énergie microscopique désordonnée. Cela correspond en réalité à un transfert d'énergie thermique entre particules, au gré des chocs aléatoires qui se produisent à l'échelle microscopique [33].

### 3.2.2 Les modes de transfert de chaleur

#### 3.2.2.1 Rayonnement

La matière émet des ondes électromagnétiques fortement dépendantes de la température. Il s'agit d'une onde électromagnétique qui ne nécessite aucun support matériel pour se propager. Outre le rayonnement thermique dont la bande de longueur d'onde va de l'ultraviolet à l'infrarouge long, le thermicien peut s'intéresser à des ondes comme les micro-ondes et leur génération dans le volume.

Le flux thermique surfacique, s'exprime par rapport à l'émission du corps noir décrit par la loi de Stefan-Boltzmann [34,35] :

$$\varphi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (3.1)$$

Avec :

- ✚  $\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann ( $5,6703 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ) ;
- ✚  $\varepsilon$  : émissivité, indice valant 1 pour un corps noir et qui est compris entre 0 et 1 selon l'état de surface du matériau (sans dimension);
- ✚  $T$  : température du corps (K).

### 3.2.2.2 Conduction

Le transfert d'énergie par conduction implique, au contraire du rayonnement, le contact direct entre les éléments qui participent au transfert thermique. Le phénomène de conduction se produit dès lors qu'il existe un gradient de température à l'intérieur du corps considéré.

Ce phénomène n'est la cause exclusive du transfert de chaleur que dans le cas de solides opaques. Dans les solides transparents ou semi-transparentes, il s'accompagne de rayonnement. Dans les fluides, surtout dans les conditions industrielles où les transferts sont importants, il est rare qu'il ne soit pas accompagné du phénomène de convection [36].

L'échange de chaleur par conduction est défini par la relation de FOURIER [37] :

$$\Phi = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (3.2)$$

Avec :

- $\Phi$ : flux de chaleur [W].
- S: surface d'échange [ $\text{m}^2$ ].
- : température [K].
- X: direction du déplacement du flux de chaleur [m].
- $\lambda$  : Coefficient de conduction thermique ou conductivité thermique [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ].

### 3.2.2.3 Convection

La convection thermique est un transfert d'énergie par rapport à un repère donné, consécutif à un transport macroscopique de masse dans ce repère [38]. La Loi de Newton permet d'expliquer le phénomène global de la convection [39] :

$$Q = \alpha \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (3.3)$$

Avec :

$\alpha$ : le coefficient d'échange convectif [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ].

$T_s$ : la température de la surface considérée [K].

$T_\infty$ : la température du fluide « au large » (suffisamment loin de la surface) [K].

### 3.3 La combustion dans les fours pétroliers

#### 3.3.1 Comment la combustion se produit à l'intérieur du four ?

La combustion dans les fours pétroliers se fait dans une chambre appelée également zone de rayonnement. Le faisceau absorbant en radiation étant disposé le long des murs réfractaires est donc soumis au rayonnement direct de la flamme qui se développe très souvent entièrement dans la chambre. La combustion s'effectue à l'aide de brûleurs à pulvérisation de vapeur capables de brûler des combustibles liquides et gazeux aux caractéristiques variables et très différentes [40].

#### 3.3.2 Réactions de combustion

Les réactions de combustion sont du type indiqué dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 3.1:** Les réactions de combustion.

Eléments	Réactions	Chaleur dégagée) (kcal/kmole)	
		Eau vapeur	Eau liquide
Carbone	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	97 600	--
Carbone	$\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$	29 400	--
Oxyde de carbone	$\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	68200	--
Hydrogène	$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	58200	69100
Soufre	$\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$	138600	--
Méthane	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	192 500	214 300
Ethane	$\text{C}_2\text{H}_6 + \frac{7}{2} \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	340 900	373 600
Propane	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5 \text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	485 100	528 700
Butane	$\text{C}_4\text{H}_{10} + \frac{13}{2} \text{O}_2 \rightarrow 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$	625 700	680 200

Ces réactions permettent de déterminer la quantité d'oxygène et donc d'air nécessaire à la combustion [32].

### 3.3.3 La chaleur de combustion

On appelle 'chaleur de combustion' à pression constante d'un corps simple ou d'un composé chimique défini, le nombre de grandes calories dégagées par la combustion avec l'oxygène d'une partie de ce combustible égale à une unité de masse. La combustion a lieu à la pression normale de 760 mm Hg de mercure avec le combustible, l'oxygène, les fumées pris à la température initiale de 0° C, et l'eau produit par la combustion totalement condensée [40].

### 3.3.4 Pouvoir calorifique inférieur PCI

Il s'agit de la quantité totale de chaleur dégagée par la combustion, n'incluant pas la condensation de la vapeur d'eau contenue dans les fumées [41].

### 3.3.5 Le pouvoir calorifique supérieur PCS

Il s'agit de la quantité d'énergie dégagée par la combustion complète, la vapeur d'eau étant supposée condensée et la chaleur récupérée. Concrètement, le PCS est égal à la somme du PCI et de la chaleur latente dans la vapeur d'eau produite par la combustion. La somme du PCS est donc toujours supérieure à celle du PCI, car le calcul du PCI ne prend pas en compte l'utilisation de l'énergie issue des fumées [41].

### 3.3.6 Excès d'air

C'est la quantité d'air nécessaire à la combustion complète du combustible. Cet excès d'air est en général de 2 à 10% sur les équipements de chauffe industriels. Un trop faible excès d'air peut conduire à une combustion incomplète, des fumées noires, un étouffement du four. Un trop large excès d'air conduit essentiellement à une perte de rendement [42].

### 3.3.7 Pouvoir comburivore

C'est la quantité d'air nécessaire pour brûler une quantité unitaire de combustible, en kg d'air par kg de combustible (pour les solides) ou en Nm<sup>3</sup> d'air par Nm<sup>3</sup> de combustible (pour les gaz) [42].

### 3.3.8 Pouvoir fumigène

C'est la quantité de fumées produites par la combustion à l'air d'une quantité unitaire de combustible, en kg de fumées par kg de combustible ou  $\text{Nm}^3$  de fumées par  $\text{Nm}^3$  de combustible [42].

## 3.4 Les Fours pétroliers

### 3.4.1 Définition

Les fours sont un important équipement de raffinage du pétrole et doivent être très efficaces pour répondre aux nombreuses exigences requises par l'usine, qui comprennent principalement la fourniture de la chaleur nécessaire utilisée par l'usine dans le raffinage du pétrole.

Dans le reste de ce chapitre, sur la base des informations et de l'expérience acquises lors de notre stage de formation à Sonatrach, nous expliquerons la structure et le fonctionnement de ces fours tubulaires.

### 3.4.2 Rôle d'un Four

Le rôle joué par les fours dans les unités pétrolières, pétrochimiques est important. Dans bien des cas, la défaillance du four ou tout simplement de l'un de ses accessoires entraîne des arrêts de l'unité. Les conséquences économiques de ces arrêts sont d'autant plus grandes que l'unité est importante. Les fours sont incorporés au train d'échange afin d'apporter la chaleur complémentaire pour réchauffer un fluide ou produire une réaction de dissociation des molécules d'une charge. Ils doivent également adsorber les variations résiduelles des transferts de chaleur de l'unité [40].

### 3.4.3 Différents types de four

De nombreux types de fours existent et il n'est pas envisagé ici de les décrire tous, il existe deux principaux types

- ✚ Le four cabine à tubes horizontaux ou verticaux (Figures 3.1 et 3.2).
- ✚ Le four cylindrique à tubes verticaux ou hélicoïdaux (Figures 3.3 et 3.4).

Ils sont destinés au chauffage de gaz ou liquide pour l'industrie pétrochimique, on distinguera notamment l'implantation des bruleurs et le circuit des fumées, et l'implantation des surfaces d'échange procédé (zone de radiation et/ou de convection) (Figures 3.5 et 3.6) [43,40].

Sont présentées ci-dessous quelques représentations de fours :

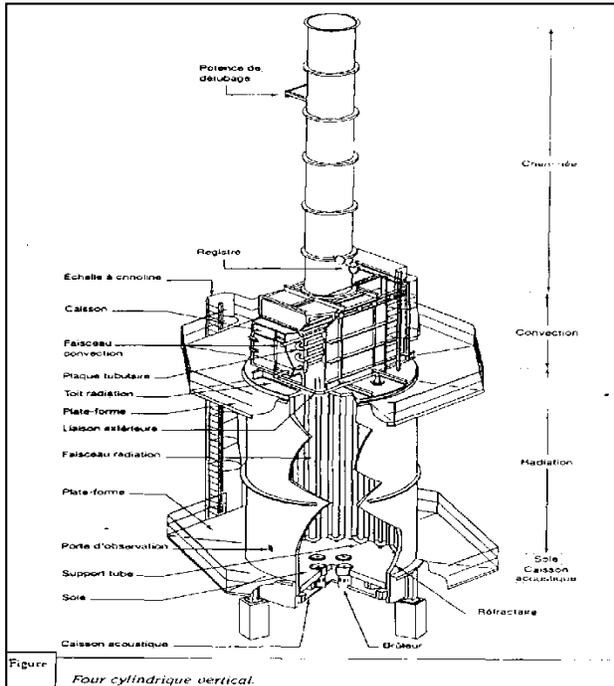


Figure 3.1: Four cylindrique à tubes verticaux [44].

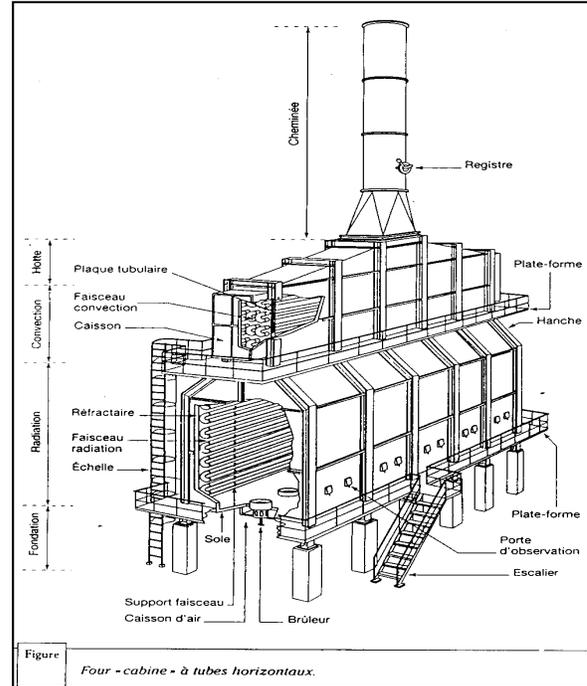


Figure 3.2: Four -cabine - à tubes horizontaux [44].

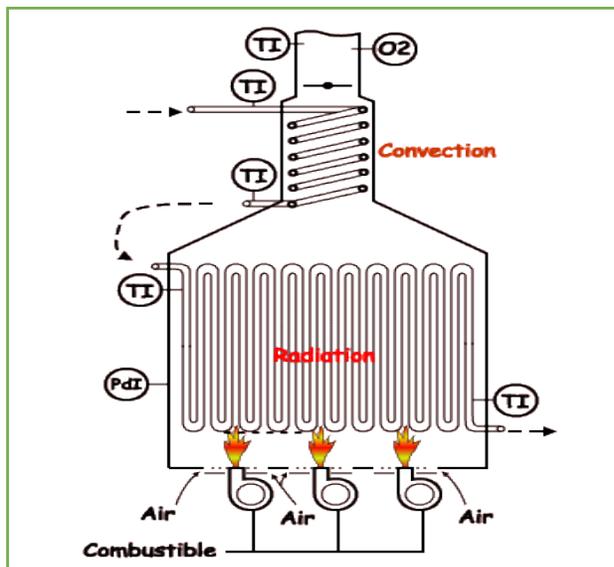


Figure 3.3: Four à convection naturelle [43].

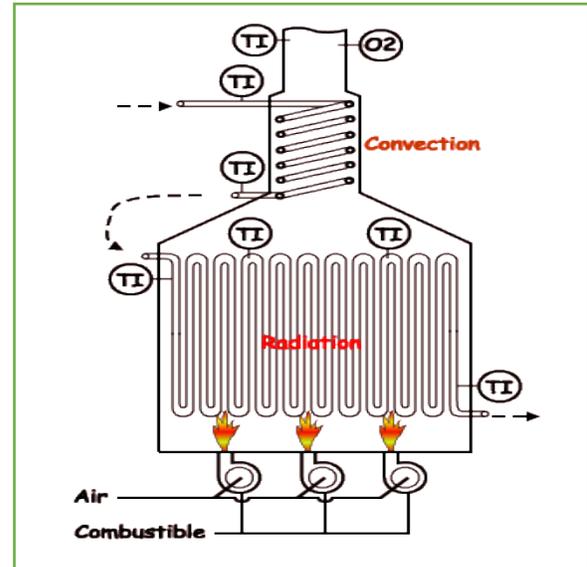
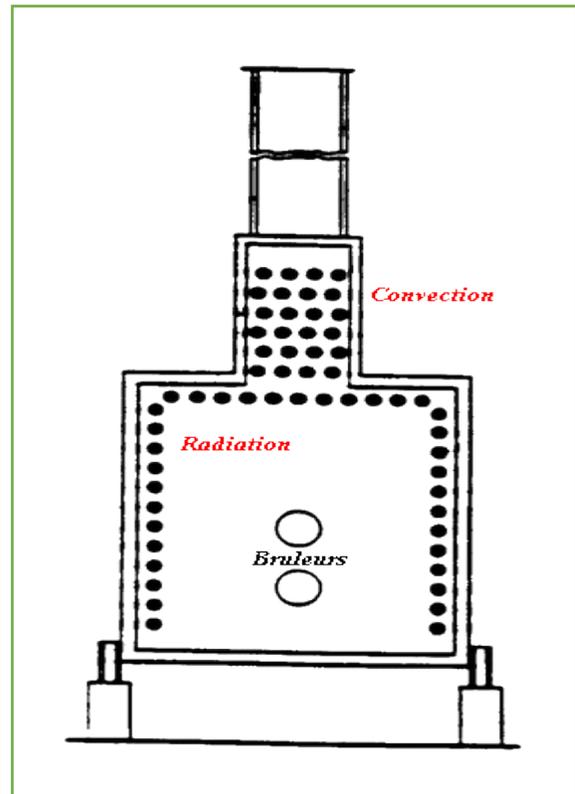
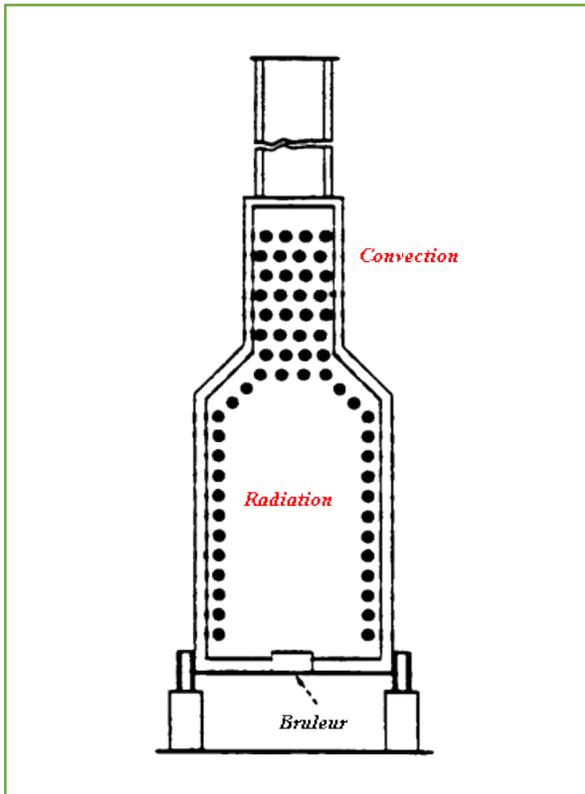


Figure 3.4: Four à convection forcée [43].



**Figure 3.5:** Four à un brûleur vertical sur la sole [43]. **Figure 3.6:** Four à deux brûleurs horizontaux [43].

### 3.4.4 Eléments d'un four tubulaire

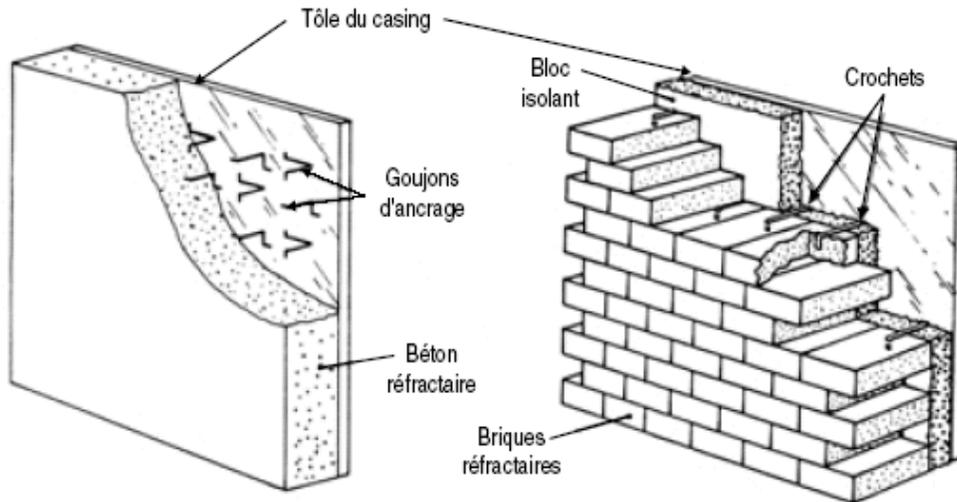
#### 3.4.4.1 Garnissage des parois du four (Enveloppe)

L'enveloppe des fours (chambre de combustion, zone de convection, cheminée) est constituée d'une paroi métallique revêtue intérieurement d'un garnissage isolant et réfractaire (Figure 3.7).

Les propriétés requises pour un garnissage isolant réfractaire sont variées :

- ✚ Conductivité thermique faible ;
- ✚ Température pyroscopique élevée ;
- ✚ Résistance mécanique élevée ;
- ✚ Bonne résistance aux variations de température ;
- ✚ Facilité de mise en œuvre ;

La sélection d'un matériau pour une application particulière est le résultat d'un compromis, dans certain cas, c'est un garnissage multicouche qui permettra d'allier les propriétés opposées de plusieurs matériaux [44].



**Figure 3.7 :** Garnissage isolant et réfractaire.

### 3.4.4.2 Faisceaux tubulaires

Les faisceaux tubulaires sont généralement constitués de tubes droits, sans soudure, reliés entre eux. Le choix du matériau pour les faisceaux des tubes repose sur les critères suivants :

- ✚ Résistance à la corrosion par le fluide chauffé ;
- ✚ Résistance à l'oxydation par les fumées chaudes ;
- ✚ Résistance mécanique en température :
  - à la pression intérieure du fluide chauffé,
  - aux contraintes mécaniques dues au poids du faisceau tubulaire et du fluide qu'il contient [44].

### 3.4.4.3 Les brûleurs

#### 3.4.4.3.1 Définition des brûleurs

Les brûleurs sont les autres dispositifs industriels utilisant la combustion, qui sont utilisés dans des fours; leur intérêt n'est pas de propulser un véhicule de type quelconque, mais de fournir

« de la chaleur », ou de détruire ou transformer certains produits. Ils sont utilisés dans l'industrie, ou dans les centrales thermiques [45].

### 3.4.4.3.2 Importance du brûleur

Le brûleur a un rôle primordial dans la conception, la construction et le fonctionnement des fours :

- ✚ il fournit l'énergie thermique au four et à la charge ;
- ✚ il prépare la mise en contact du combustible et du comburant ;
- ✚ il provoque la circulation des gaz brûlés favorisant l'égalisation des températures dans l'enceinte ;
- ✚ il crée une liaison entre le casing extérieur du four et les parois en réfractaire qu'il traverse, et entraîne de ce fait, un point délicat dans la construction [46].

### 3.4.4.3.3 Type des brûleurs

Il existe de nombreux types de brûleurs, certains pour un type de four et / ou pour un combustible, et d'autres pour un usage plus large. Nous nous limiterons à essayer de mentionner les plus importants :

- ✚ Brûleurs à air induit ; brûleurs à air soufflé ; brûleurs auto-récupérateurs ; les brûleurs à prémélange (Figure 3.8) [46].
- ✚ Les brûleurs à flamme de diffusion [47].

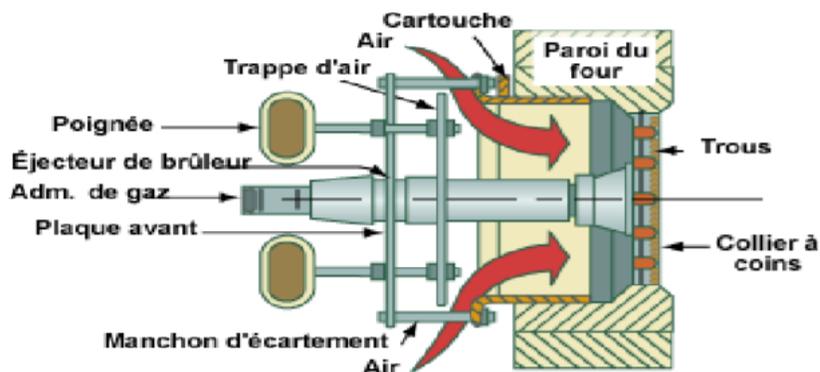


Figure 3.8 : Brûleur à prémélange type [48].

### 3.4.4.4 L'APH

Un préchauffeur d'air est un échangeur tubulaire ou à plaque dispositif qui utilise une partie de la chaleur du gaz de carneau pour augmenter la température de l'air fourni aux brûleurs. Plus la température d'alimentation en air est élevée, moins la chaleur est absorbée par l'air dans le four. Par conséquent, en récupérant la chaleur qui, dans le cas contraire, serait perdue par la cheminée, le préchauffeur d'air économise de l'énergie [48].

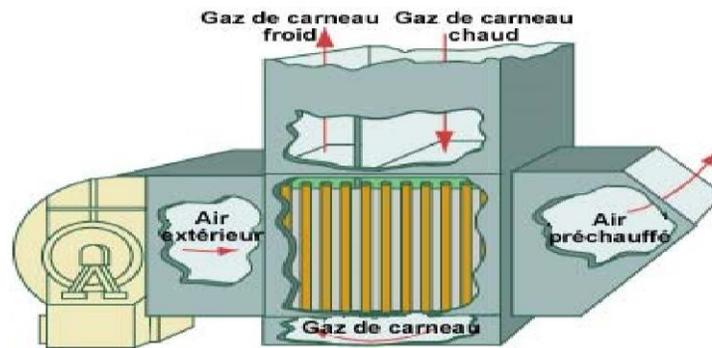


Figure 3.9 : Préchauffeur d'air [48].

#### 3.4.4.4.1 Rôle de l'APH

Les systèmes de récupération de chaleur jouent un rôle important du point de vue énergétique et thermique, où l'on arrive à épuiser toute la chaleur contenue dans les fumées par échange à contre-courant sur les produits entrants, les fumées quittent le four à une température qui peut être encore relativement élevée. Il est donc intéressant, pour limiter les consommations énergétiques, de récupérer l'énergie thermique contenue dans les fumées avant leur sortie à l'atmosphère. Cette récupération de chaleur se fait dans des équipements annexes implantés dans le circuit de fumées qui permettent soit :

- ✚ de préchauffer l'air de combustion : cette technique se pratique surtout sur les fours de sidérurgie et de verrerie ;
- ✚ de réchauffer un fluide (vapeur, eau chaude ou fluide caloporteur) étranger au procédé du four proprement dit : ce réchauffage d'un fluide externe se pratique surtout sur les fours de raffinerie et de l'industrie chimique.

La chaleur ainsi récupérée peut se situer entre 5 et 20 % de l'énergie initialement contenue dans le combustible [46].

### 3.4.4.2 Différents types de L'APH

Nous décrivons seulement les deux types les plus rencontrés dans l'industrie :

#### a) réchauffeur d'air intégré

Ce sont des échangeurs constitués de tubes en acier (Figure 3.10), placés en zone de convection du four et dont la constitution est identique à celle des zones de convection classique de réchauffage de fluides de procédés.

#### b) réchauffeur d'air séparé

Deux types principaux se trouvent sur le marché (Figure 3.11) :

- les réchauffeurs statiques ;
- les réchauffeurs dynamiques ou régénératifs [44].

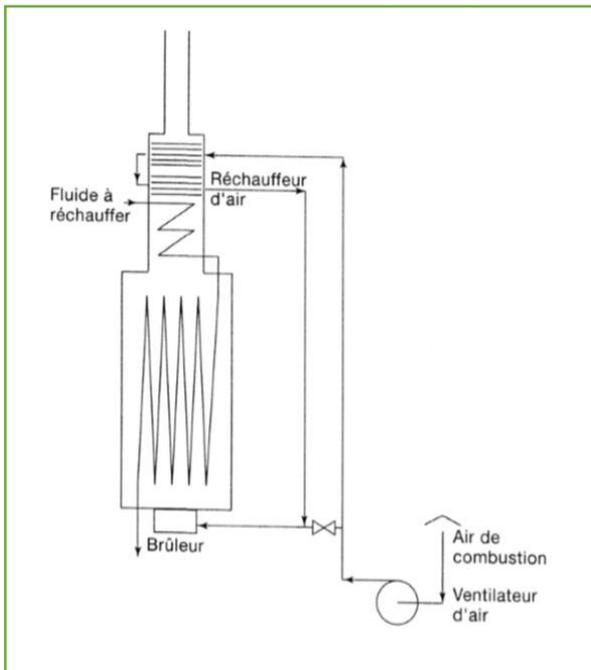


Figure 3.10 : Réchauffeur d'air intégré [44].

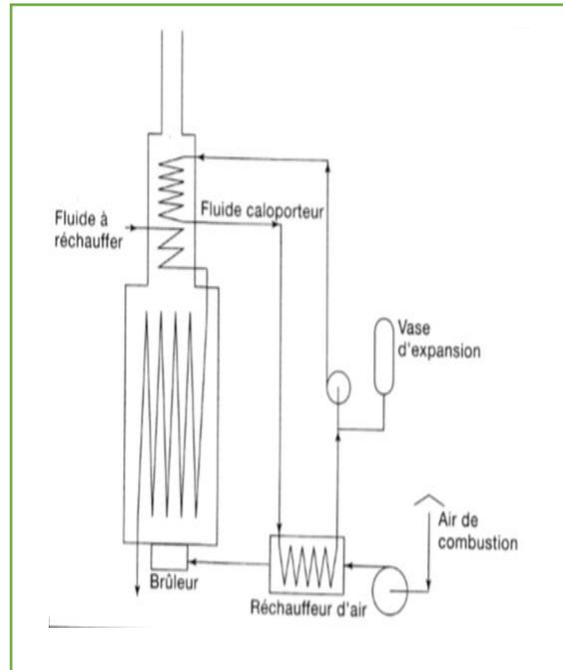


Figure 3.11 : Réchauffeur d'air séparé [44].



*Chapitre 04:*  
*Calcul du Rendement*  
*Thermique et du Gain*  
*d'argent*



### 4.1 But de l'Etude

L'unité topping RA2K du condensât de Skikda comporte trois fours tubulaires et une cheminée commune et avec un préchauffeur d'air commun, l'unité utilise le four F103 comme rebouilleur de la colonne de distillation atmosphérique, le four F102 comme préchauffeur de la colonne de distillation atmosphérique et le four F101 comme rebouilleur de la colonne de préfractionnement (Figure 4.1). La technologie d'APH est une nouvelle technologie dans les fours de raffinerie en Algérie, après le complexe RA2K de Skikda, la technologie a été distribuée dans toutes les raffineries pour son caractère environnemental et économique.

L'objectif principal de notre étude est de calculer et de déterminer :

- Le Rendement thermique des trois fours à partir des données de Sonatrach avec et sans APH.
- Le Gain d'énergie obtenu par le fonctionnement de l'APH.

L'optimisation de la consommation d'énergie du gaz naturel s'inscrit dans l'objectif de diminuer les coûts d'exploitation du complexe topping de Skikda et la protection de l'environnement.

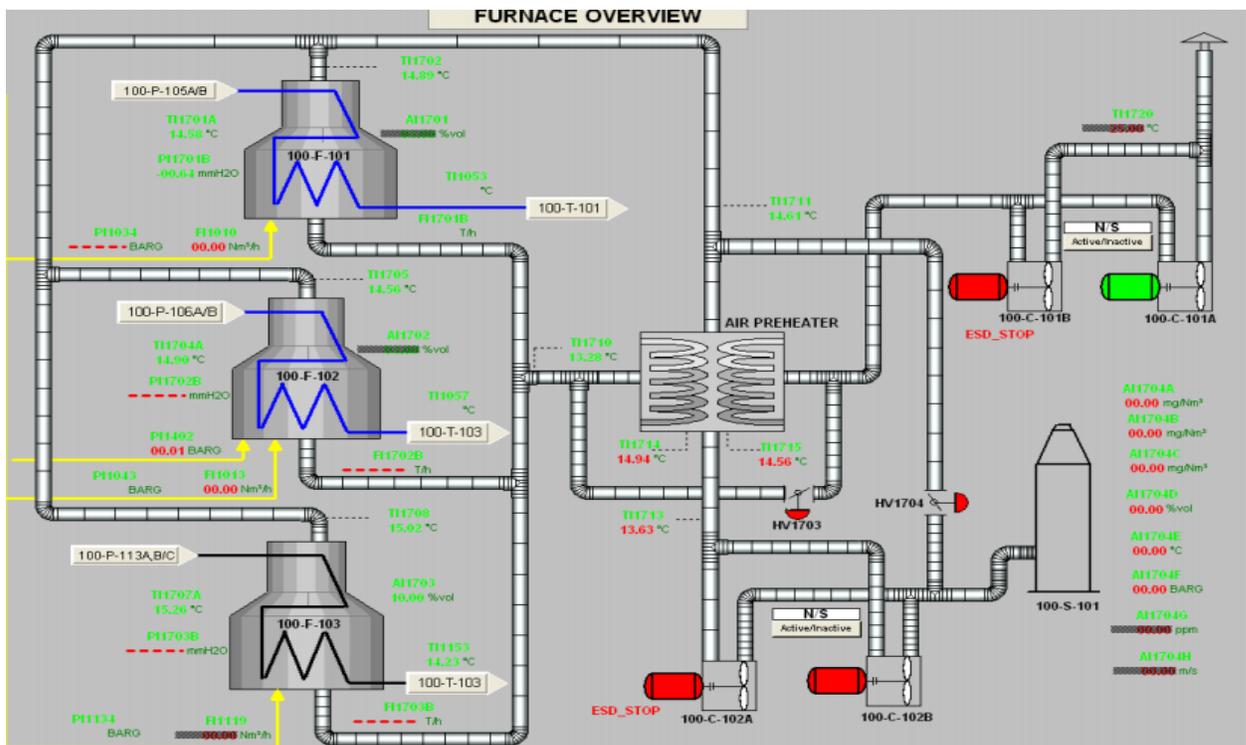


Figure 4.1 : Trois fours d'une cheminée commune avec un APH.

### 4.2 Rendement thermique des fours

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

Le réchauffage de l'air de combustion permet d'obtenir un rendement thermique de l'ordre de 90% du pouvoir calorifique inférieur [43].

### 4.3 Méthodes de calcul du rendement thermique d'un four tubulaire

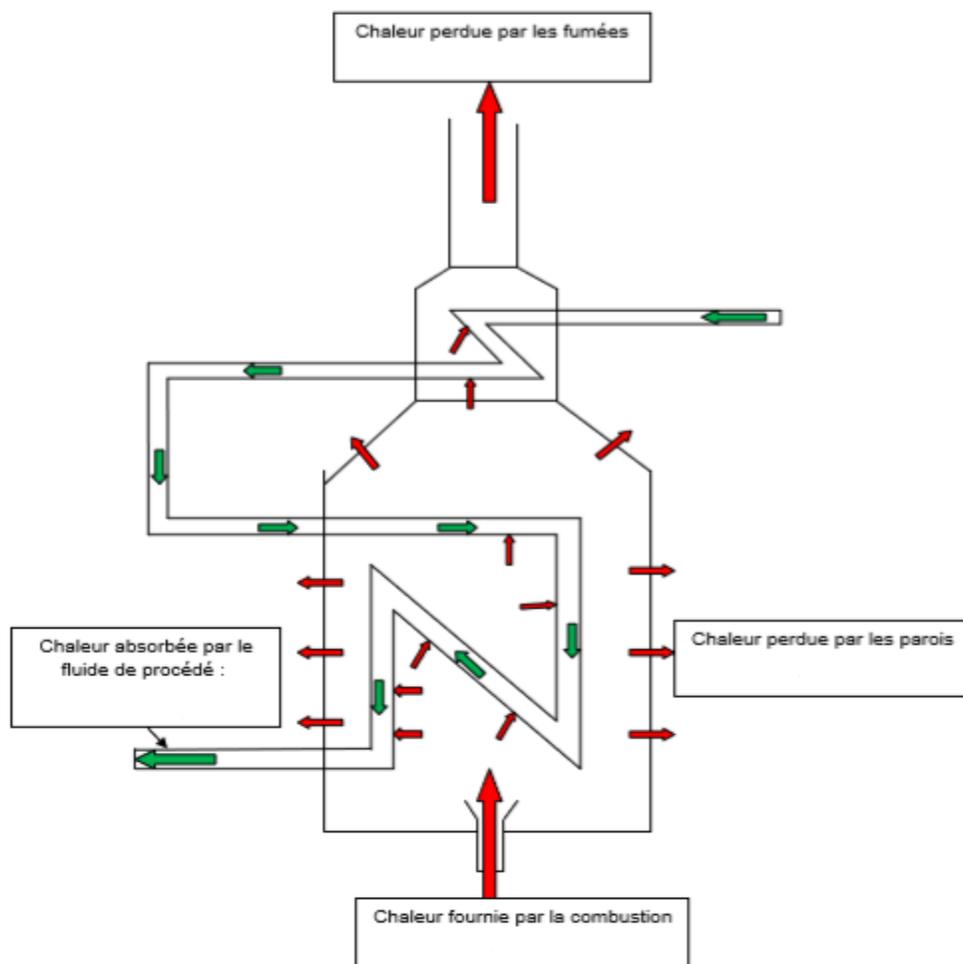


Figure 4.2 : Types des pertes de chaleur dans le four.

Le bilan thermique du four s'exprime d'après la figure 4.2 comme suit:

$$Q_{\text{fournie}} = Q_{\text{absorbée}} + Q_{\text{fumée}} + Q_{\text{parois}} \quad (4.1)$$

Avec :

$Q_{\text{fournie}}$  : la chaleur fournie par la combustion ;

$Q_{\text{absorbée}}$  : la chaleur absorbée par le fluide de procédé ;

$Q_{\text{fumée}}$  : la chaleur perdue par les fumées ;

$Q_{\text{parois}}$  : la chaleur perdue par les parois.

Donc pour calculer le rendement, nous déterminons la quantité de chaleur fournie par la combustion et la perte de chaleur par les parois du four et les fumées, et le rendement est déterminée par l'équation suivante :

$$\eta_{(\%)} = \frac{Q_{\text{fournie}} - Q_{\text{fumées}} - Q_{\text{parois}}}{Q_{\text{fournie}}} \times 100 \quad (4.2)$$

Dans notre étude, nous calculons les pertes subies par les fumées, et également les pertes perdues par les murs, qui sont considérées comme faibles parce que le matériau d'enveloppe isolante est récent, nous considérons donc que le matériau réfractaire de la chambre de combustion est en bon état.

#### 4.4 Données d'étude

Les données utilisées dans l'étude sont indiquées dans les tableaux 4.1 ; 4.2 et 4.3 suivants :

**Tableau 4.1:** Four F-101 rebouilleur de la colonne de préfractionnement.

<b>Four 100-F-101</b>		
<b>Paramètres de combustion</b>	<b>Préchauffeur d'air (°C)</b>	<b>Rebouilleur (°C)</b>
Température des fumées à l'entrée du	394,2	409,5
Température des fumées à la sortie du	170,2	409,5
Teneur en O <sub>2</sub> dans les fumées (%)	3,60	3,38
Température de l'air de combustion entrée à	20	20
Température de l'air de combustion sortie du	253,6	20
Débit du gaz combustible (Nm <sup>3</sup> /h)	2788,88	3050,2
<b>Fluide de procédé : fond de la colonne T101 (condensât stabilisé)</b>		
Débit du fluide (t/h)		403,195
Température d'entrée du fluide (°C)		180
Température de sortie du fluide (°C)		212
Humidité relative (%)		70

**Tableau 4.2:** Four F-102 préchauffeur de la colonne de distillation atmosphérique 100-T-103.

<b>Four 100-F-102</b>		
<b>Paramètres de combustion</b>	<b>Préchauffeur d'air (°C)</b>	<b>Préchauffeur de la colonne de distillation atmosphérique (°C).</b>
Température des fumées à l'entrée du	378,5	392,5
Température des fumées à la sortie du	170,2	392,5
Teneur en O <sub>2</sub> dans les fumées (%)	3,08	3,41
Température de l'air de combustion entrée à	20	20
Température de l'air de combustion sortie du	253,6	20
Débit du gaz combustible (Nm <sup>3</sup> /h)	2551,3	2994,9
<b>Fluide de procédé : Charge de la colonne 100-T-103 (fond de la colonne de préfractionnement T101)</b>		
Débit du fluide (t/h)		308,1
Température d'entrée du fluide (°C)		180
Température de sortie du fluide (°C)		197
Humidité relative (%)		70

**Tableau 4.3:** Four F-103 : rebouilleur de la colonne de distillation atmosphérique 100-T-103.

<b>Four 100-F-103</b>		
<b>Paramètres de combustion</b>	<b>Préchauffeur d'air (°C)</b>	<b>Rebouilleur</b>
Température des fumées à l'entrée du	360 ,5	368,5
Température des fumées à la sortie du	170,2	368,5
Teneur en O <sub>2</sub> dans les fumées (%)	3,2020	3,40
Température de l'air de combustion entrée à	20	20
Température de l'air de combustion sortie du	253,6	20
Débit du gaz combustible (Nm <sup>3</sup> /h)	1795,3	2075,1
<b>Fluide de procédé : fond de la colonne 100-T-103 (gasoil lourd atmosphérique)</b>		
Débit du fluide (t/h)		1190,85
Température d'entrée du fluide (°C)		347,5
Température de sortie du fluide (°C)		356
Humidité relative (%)		70

Les trois fours sont récents et par conséquent le matériau réfractaire est en bon état, nous considérons le taux de marche étudié à 100 %.

#### 4.5 Composition du gaz combustible

Les données sur le gaz de combustion qui nous ont été données dans l'unité de Sonatrach sont indiquées dans le tableau suivant :

**Tableau 4.4:** Les pourcentages volumiques des constituants du gaz de combustion.

<b>Constituants</b>	<b>Formule chimique</b>	<b>% Volumique (yi)</b>
Méthane	CH <sub>4</sub>	78,23
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6,45
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,98
Butène	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	0,19
Iso butane	iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1,14
n – butane	nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	7,07
iso pentane	iC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,32
n – pentane	nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,47
Dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>	0,17
Azote	N <sub>2</sub>	3,98
Total		100

### 4.6 Pouvoir calorifique inférieur (PCI) des constituants du gaz combustible

**Tableau 4.5:** PCI des constituants du gaz de combustion.

Constituants	Formule chimique	PCI (kcal /Nm <sup>3</sup> )
Méthane	CH <sub>4</sub>	8554,46
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	15323,66
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	21795,98
Butène	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	27120,98
Iso butane	iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	28294,64
n – butane	nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	28268,30
iso pentane	iC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	34893,30
n – pentane	nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	34776,79
Dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>	0
Azote	N <sub>2</sub>	0

### 4.7 Estimation du PCI du mélange de gaz combustible

Le PCI du mélange de gaz combustible est déterminé par la formule suivante :

$$PCI = \sum_i^n PCI_i \cdot Y_i / 100 \quad (4.3)$$

*Application numérique :*

$$PCI = \sum_i^n 8554,46 \times 0,7823 + 15323,66 \times 0,0645 + 21795,98 \times 0,0198 + 27120,98 \times 0,0019 + 28294,64 \times 0,0114 + 28268,30 \times 0,0707 + 34893,30 \times 0,0032 + 34776,79 \times 0,0047$$

$$PCI_{\text{Combustible}} = 10759,85757 \text{ Kcal/Nm}^3$$

### 4.8 Quantité de chaleur fournie par la combustion (Q<sub>fournie</sub>)

La quantité de chaleur fournie par la combustion est donnée par :

$$Q_{\text{fournie}} = V_c \times PCI \text{ (kcal/h)} \quad (4.4)$$

Avec :

- V<sub>c</sub> : débit du gaz combustible en Nm<sup>3</sup>/h.
- PCI : pouvoir calorifique inférieur du gaz combustible en kcal/Nm<sup>3</sup>.

Application numérique :

## Four 101

### Avec préchauffeur d'air

$$Q = 2788,88 \times 10759,85757$$

$$Q = 30007951,58 \text{ Kcal/h}$$

### Sans préchauffeur d'air

$$Q = 3050,2 \times 10759,85757$$

$$Q = 32819717,65 \text{ Kcal/h}$$

## Four 102

### Avec préchauffeur d'air

$$Q = 2551,3 \times 10759,85757$$

$$Q = 27451624,62 \text{ Kcal/h}$$

### Sans préchauffeur d'air

$$Q = 2994,9 \times 10759,85757$$

$$Q = 32224697,44 \text{ Kcal/h}$$

## Four 103

### Avec préchauffeur d'air

$$Q = 1795,3 \times 10759,85757$$

$$Q = 19317172,3 \text{ Kcal/h}$$

### Sans préchauffeur d'air

$$Q = 2075,1 \times 10759,85757$$

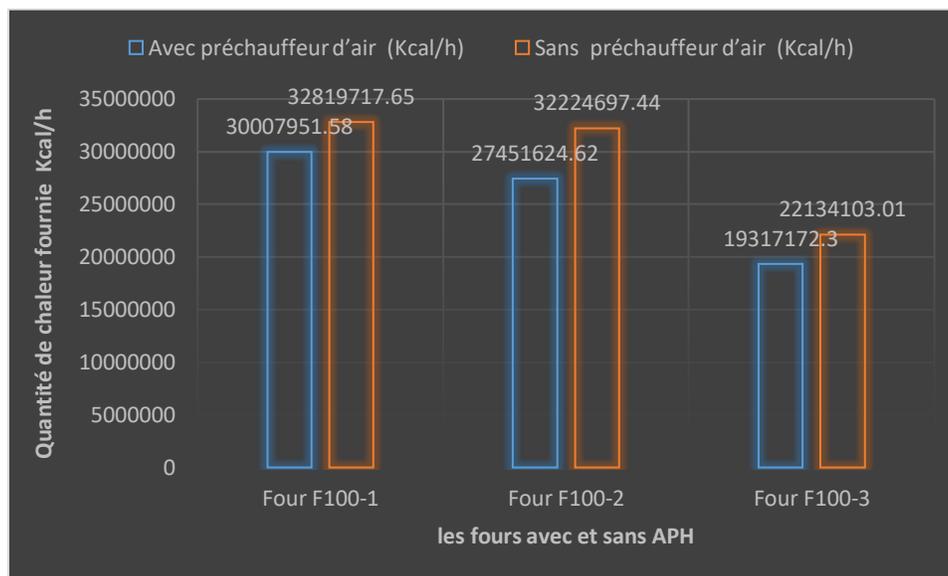
$$Q = 22134103,01 \text{ Kcal/h}$$

Toutes les valeurs sont reportées sur le tableau suivant :

**Tableau 4.6:** Valeur de quantité de chaleur fournie par la combustion.

	Avec préchauffeur d'air (Kcal/h)	Sans préchauffeur d'air (Kcal/h)
Four F100-1	30007951,58	32819717,65
Four F100-2	27451624,62	32224697,44
Four F100-3	19317172,3	22134103,01

Nous représentons les résultats du tableau 4.6 par la figure suivante :



**Figure 4.3 :** Quantité de chaleur fournie par les trois fours avec et sans APH.

À partir des données du tableau 4.6 et de la lecture de la figure 4.3, nous concluons que la quantité de chaleur fournie par la combustion est assez importante pour un cas sans APH, cela signifie que l'utilisation de la technologie APH ne consomme pas beaucoup d'énergie pour la combustion.

### 4.9 Réactions de combustion



### 4.10 Composition des fumées

La base de notre calcul c'est 100 Nm<sup>3</sup> de gaz combustible

A partir des réactions de combustion mentionnées dans le paragraphe précédent on peut calculer les volumes V<sub>O<sub>2</sub></sub>, V<sub>CO<sub>2</sub></sub> et V<sub>H<sub>2</sub>O</sub> qui sont donnés en Nm<sup>3</sup> par 100 Nm<sup>3</sup> de gaz combustible il faut utiliser les estimations suivantes :

$$V_{\text{CO}_2 \text{ fumées}} = V_{\text{CO}_2 \text{ généré par la combustion}} + V_{\text{CO}_2 \text{ combustible}} \quad (4.13)$$

$$V_{\text{N}_2} \Rightarrow$$

$$\left. \begin{array}{l} V_{\text{N}_2} \rightarrow 79\% \\ V_{\text{O}_2} \rightarrow 21\% \end{array} \right\}$$

$$V_{\text{N}_2} = V_{\text{O}_2} \frac{79}{21} = 3,76 V_{\text{O}_2}$$

$$V_{\text{N}_2 \text{ fumées}} = 3,76 V_{\text{O}_2 \text{ air de combustion}} + V_{\text{N}_2 \text{ combustible}} \quad (4.14)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O} \text{ fumées}} = V_{\text{H}_2\text{O} \text{ générée par la combustion}} + V_{\text{H}_2\text{O} \text{ air de combustion}} \quad (4.15)$$

$$V_{\text{air de combustion}} \Rightarrow$$

$$\left. \begin{array}{l} V_{\text{air}} = 100\% \\ V_{\text{O}_2} = 21\% \end{array} \right\}$$

$$V_{\text{air}} = \frac{100}{21} V_{\text{O}_2} = 4,76 V_{\text{O}_2}$$

$$V_{\text{air de combustion}} = 4,76 V_{\text{O}_2 \text{ air de combustion}} \quad (4.16)$$

✚ Détermination de la quantité de vapeur d'eau dans l'air de combustion

Humidité relative : 70 % (météo Skikda, le jour 24/02/2020 à 14h : 15 minutes)

Tension de vapeur de l'eau à 20°C : 17,4 mm Hg [33].

Quantité d'eau dans l'air de combustion :

$$\text{Quantité d'eau dans l'air de combustion} = \frac{P^\circ \times H\%}{P_t - P^\circ} \times V_{\text{air}} = \frac{17,4 \times 0,7}{760 - 17,4} \times V_{\text{air}} \quad (4.17)$$

Avec :

- H : Humidité relative.
- $P^\circ$  : Tension de vapeur de l'eau.
- $P_t$  : Pression totale.

$$\text{Quantité d'eau dans l'air de combustion} = 0,016401831 \times V_{\text{air}} \quad (4.18)$$

### 4.10.1 Composition théorique des fumées

D'après les réactions de combustion précédentes (4.5) jusqu'à (4.12) et compte tenu de la connaissance de la composition du gaz combustible, on peut déterminer les volumes ( $V_{\text{CO}_2}$ ,  $V_{\text{H}_2\text{O}}$  et  $V_{\text{N}_2}$ ) nécessaires à la combustion théorique de  $100\text{Nm}^3/\text{h}$  de combustible. Les valeurs obtenues sont les suivantes :

Avec :  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  sont les fractions volumiques des constituants.

A partir des réactions de la combustion :

$$\text{✚ } V_{\text{O}_2} = (2X_1 + \frac{7}{2}X_2 + 5X_3 + 6X_4 + \frac{13}{2}X_5 + \frac{13}{2}X_6 + 8X_7 + 8X_8) \times V_{\text{gaz}} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} V_{\text{O}_2} &= (2 \times \frac{78,23}{100\%} + \frac{7}{2} \times \frac{6,45}{100\%} + 5 \times \frac{1,98}{100\%} + 6 \times \frac{0,19}{100\%} + \frac{13}{2} \times \frac{1,14}{100\%} + \frac{13}{2} \times \frac{7,07}{100\%} + 8 \times \frac{0,32}{100\%} + \\ &\quad 8 \times \frac{0,47}{100\%}) \times 100\text{Nm}^3 \\ &= 249,76 \text{ Nm}^3 \end{aligned}$$

$$\text{✚ } V_{\text{CO}_2} = (X_1 + 2X_2 + 3X_3 + 4X_4 + 4X_5 + 4X_6 + 5X_7 + 5X_8) \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} V_{\text{CO}_2} &= (\frac{78,23}{100\%} + 2 \times \frac{6,45}{100\%} + 3 \times \frac{1,98}{100\%} + 4 \times \frac{0,19}{100\%} + 4 \times \frac{1,14}{100\%} + 4 \times \frac{7,07}{100\%} + 5 \times \frac{0,32}{100\%} + \\ &\quad 5 \times \frac{0,47}{100\%}) \times 100 \text{ Nm}^3 \\ &= 134,62 \text{ Nm}^3 \end{aligned}$$

$$\text{✚ } V_{\text{H}_2\text{O}} = (2X_1 + 3X_2 + 4X_3 + 4X_4 + 5X_5 + 5X_6 + 6X_7 + 6X_8) \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned}
 V_{\text{H}_2\text{O}} &= \left( 2 \times \frac{78,23}{100\%} + 3 \times \frac{6,45}{100\%} + 4 \times \frac{1,98}{100\%} + 4 \times \frac{0,19}{100\%} + 5 \times \frac{1,14}{100\%} + 5 \times \frac{7,07}{100\%} + 6 \times \frac{0,32}{100\%} + \right. \\
 &\quad \left. 6 \times \frac{0,47}{100\%} \right) \times 100 \text{ Nm}^3 \\
 &= 230,28 \text{ Nm}^3
 \end{aligned}$$

Alors, la combustion théorique de 100 Nm<sup>3</sup> de gaz combustible génère :

$$V_{\text{CO}_2} = 134,62 \text{ Nm}^3$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 230,28 \text{ Nm}^3$$

$$V_{\text{O}_2 \text{ théorique}} = 249,76 \text{ Nm}^3$$

$$V_{\text{N}_2} = 3,76 \times V_{\text{O}_2 \text{ théorique}} = 3,76 \times 249,76 = 939,097 \text{ Nm}^3 \quad (4.22)$$

$$V_{\text{air théorique}} = \sum(V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2 \text{ théorique}}) \text{ Nm}^3 \quad (4.23)$$

$$V_{\text{air théorique}} = (249,76 + 939,097)$$

$$V_{\text{air théorique}} = 1188,857 \text{ Nm}^3$$

Les valeurs calculées sont notées dans le tableau suivant :

**Tableau 4.7:** Les valeurs de composition théorique des fumées.

Constituants	% Vol	VO <sub>2</sub>	VCO <sub>2</sub>	VH <sub>2</sub> O
CH <sub>4</sub>	78,23	156,46	78,23	156,46
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	6,45	22,575	12,9	19,35
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,98	9,9	5,94	7,92
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	0,19	1,14	0,76	0,76
iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1,14	7,41	4,56	5,7
nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	7,07	45,955	28,28	35,35
iC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,32	2,56	1,6	1,92
nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,47	3,76	2,35	2,82
CO <sub>2</sub>	0,17			
N <sub>2</sub>	3,98			
Total	100%	249,76	134,62	230,28

D'après les quantités de CO<sub>2</sub> et de N<sub>2</sub> contenues dans le gaz combustible, donc On peut calculer les quantités des constituants des fumées comme suit :

- $V_{CO_2} = V_{CO_2 \text{ généré par la combustion}} + V_{CO_2 \text{ dans le gaz de combustible}}$  (4.24)

$$V_{CO_2} = 134,62 + 0,17 \times \frac{100 \text{ Nm}^3}{100\%}$$

$$V_{CO_2} = 134,79 \text{ Nm}^3$$

- $V_{H_2O} = V_{H_2O \text{ généré par la combustion}} + V_{H_2O \text{ air de combustion}}$  (4.25)

$$V_{H_2O} = 230,28 + 0,016401831 \times V_{\text{air}}$$

$$V_{H_2O} = 230,28 + 0,016401831 \times 1188,857$$

$$V_{H_2O} = 249,779 \text{ Nm}^3$$

- $V_{O_2} = V_{O_2 \text{ théorique}} = 249,76 \text{ Nm}^3$  (4.26)

- $V_{N_2} = 3,76 \times V_{O_2} + V_{N_2 \text{ combustible}}$  (4.27)

$$V_{N_2} = 3,76 \times 249,76 + 3,98$$

$$V_{N_2} = 943,07 \times \frac{100 \text{ Nm}^3}{100\%} = 943,07 \text{ Nm}^3$$

La valeur totale = 1577,399 Nm<sup>3</sup>

### Un exemple de calcul des pourcentages volumiques

$$1577,399 \text{ Nm}^3 \rightarrow 100\%$$

$$134,79 \text{ Nm}^3 \rightarrow \delta$$

$$\left[ \begin{array}{l} \delta = \frac{134,79 \times 100}{1577,399} \\ \delta = 8,54 \% \end{array} \right.$$

Les valeurs calculées sont notées dans le tableau suivant :

**Tableau 4.8:** Les quantités des constituants des fumées.

Constituants	V (Nm <sup>3</sup> /100 Nm <sup>3</sup> de combustible)	Pourcentages volumiques
CO <sub>2</sub>	134,79	8,545
H <sub>2</sub> O	249,779	15,835
O <sub>2</sub>	249,76	15,833
N <sub>2</sub>	943,07	59,786
Totale	1577,399	100%

### 4.10.2 Composition réelle des fumées (avec excès d'air)

En considérant :

$\beta$  le volume d'O<sub>2</sub> dans les fumées ou bien l'excès d'air en Nm<sup>3</sup>.

Donc :

$$\beta = V_{O_2 \text{ (théorique)}} \times \text{teneur en } O_2 \text{ dans les fumées} \quad (4.28)$$

- $V_{O_2 \text{ (fumées)}} = \beta \quad (4.29)$

- $V_{CO_2 \text{ (fumées)}} = V_{CO_2 \text{ (généré par la combustion)}} + V_{CO_2 \text{ (combustible)}} \quad (4.30)$

- $V_{N_2 \text{ (fumées)}} = 3,76 \times V_{O_2 \text{ (théorique)}} + V_{N_2 \text{ (combustible)}} + 3,76 \times \beta \quad (4.31)$

$$V_{N_2 \text{ (fumées)}} = 3,76 \times 249,76 + \frac{3,98 \times 100 \text{ Nm}^3}{100\%} + 3,76 \times \beta$$

$$V_{N_2 \text{ (fumées)}} = 943,07 + 3,76 \times \beta \quad (4.32)$$

- $V_{H_2O \text{ (fumées)}} = V_{H_2O \text{ (générée par la combustion)}} + V_{H_2O \text{ (air de combustion réelle)}} \quad (4.33)$

$$V_{H_2O \text{ (fumées)}} = V_{H_2O \text{ (générée par la combustion)}} + 0,016401831 V_{\text{air}}$$

$$V_{H_2O \text{ (fumées)}} = V_{H_2O \text{ (générée par la combustion)}} + 0,016401831 \times 4,76 \times V_{O_2}$$

$$V_{H_2O \text{ (fumées)}} = 249,779 + 0,078072715 \times \beta$$

- $V_{\text{air de combustion}} = 4,76 [V_{O_2 \text{ (théorique)}} + \beta] \quad (4.34)$

Les valeurs des constituants des fumées de la combustion réelle de 100 Nm<sup>3</sup> de gaz combustible, en fonction de  $\beta$ , sont rassemblées dans le tableau suivant :

**Tableau 4.9:** Les valeurs des constituants des fumées de la combustion réelle.

Constituants	V (Nm <sup>3</sup> /100 Nm <sup>3</sup> de combustible)
CO <sub>2</sub>	134,79
H <sub>2</sub> O	249,779 + 0,078072715 × β
O <sub>2</sub>	β
N <sub>2</sub>	243,07 + 3,76 × β
Total	1327,639 + 4,8380 × β

Les compositions réelles des fumées dans les trois fours sont données dans les tableaux 4.10 ; 4.11 et 4.12 ci-après.

### Four 100-F-101

#### Calcul α avec APH

$$\beta = V_{O_2 \text{ (théorique)}} \times X_{O_2} = 249,76 \times 3,60\% = 8,9913 \text{ Nm}^3$$

#### Calcul α sans APH

$$\beta = V_{O_2 \text{ (théorique)}} \times X_{O_2} = 249,76 \times 3,38\% = 8,4418 \text{ Nm}^3$$

#### Exemple de Calcul du pourcentage

$$\left[ \begin{array}{l} 1371,138 \rightarrow 100\% \\ 134,79 \rightarrow x \end{array} \right.$$

$$x = \frac{134,79 \times 100}{1371,138} = 9,83 \%$$

**Tableau 4.10:** Les compositions réelles des fumées dans le Four 100-F-101.

Four 100-F-101				
Constituants	Avec APH		Sans APH	
	V (Nm <sup>3</sup> )	% Vol	V (Nm <sup>3</sup> )	% Vol
CO <sub>2</sub>	134,79	9,83	134,79	9,849
H <sub>2</sub> O	250,48	18,26	250,43	18,29
O <sub>2</sub>	8,9913	0,6557	8,4418	0,6168
N <sub>2</sub>	976,877	71,24	974,81	71,23
Total	1371,138	100%	1368,48	100%

### Four 100-F-102

#### Calcul $\alpha$ avec APH

$$\beta = V_{O_2 \text{ (théorique)}} \times X_{O_2} = 249,76 \times 3,08 \% = 7,6926 \text{ Nm}^3$$

#### Calcul $\alpha$ sans APH

$$\beta = V_{O_2 \text{ (théorique)}} \times X_{O_2} = 249,76 \times 3,50 \% = 8,7416 \text{ Nm}^3$$

#### Exemple de Calcul du pourcentage

$$\left\{ \begin{array}{l} 1364,85 \rightarrow 100\% \\ 134,79 \rightarrow x \end{array} \right.$$

$$x = \frac{134,79 \times 100}{1364,85} = 9,87 \%$$

**Tableau 4.11:** Les compositions réelles des fumées dans le Four 100-F-102.

<b>Four 100-F-102</b>				
Constituants	Avec APH		Sans APH	
	V (Nm <sup>3</sup> )	% Vol	V (Nm <sup>3</sup> )	% Vol
CO <sub>2</sub>	134,79	9,87	134,79	9,83
H <sub>2</sub> O	250,37	18,34	250,46	18,28
O <sub>2</sub>	7,6926	0,5636	8,7416	0,6381
N <sub>2</sub>	971,99	71,21	975,93	71,23
Total	1364,85	100%	1369,93	100%

### Four 100-F-103

#### Calcul $\alpha$ avec APH

$$\beta = V_{O_2 \text{ (théorique)}} \times X_{O_2} = 249,76 \times 3,20\% = 7,992 \text{ Nm}^3$$

#### Calcul $\alpha$ sans APH

$$\beta = V_{O_2 \text{ (théorique)}} \times X_{O_2} = 249,76 \times 3,30 \% = 8,242 \text{ Nm}^3$$

### Exemple de Calcul de pourcentage

$$\left\{ \begin{array}{l} 1366,30 \rightarrow 100\% \\ 134,79 \rightarrow x \end{array} \right.$$

$$x = \frac{134,79 \times 100}{1366,30} = 9,86 \%$$

**Tableau 4.12:** Les compositions réelles des fumées dans le Four 100-F-103.

<b>Four 100-F-103</b>				
	Avec APH		Sans APH	
Constituants	V (Nm <sup>3</sup> )	% Vol	V (Nm <sup>3</sup> )	% Vol
CO <sub>2</sub>	134,79	9,86	134,79	9,85
H <sub>2</sub> O	250,40	18,32	250,42	18,31
O <sub>2</sub>	7,992	0,584	8,242	0,602
N <sub>2</sub>	973,11	68,58	974,05	71,22
Total	1366,30	100%	1367,5	100%

#### 4.11 Quantité de chaleur perdue par les fumées (Q<sub>fumées</sub>)

$$Q_{\text{fumées}} = n \cdot C_{p_{\text{moy}}} (T_f - 0) \tag{4.35}$$

Avec :

- **n** : débit molaire des fumées
- **C<sub>p<sub>moy</sub></sub>** : chaleur spécifique moyenne des fumées ;
- **T<sub>f</sub>** : température de rejet des fumées ;
- On considère la température de référence 0 °C.

Nous utilisons la formule suivante pour calculer la chaleur spécifique moyenne des fumées :

$$C_{p_{\text{moy}}} = \frac{\sum_i^n c_{p_i} \cdot y_i}{100} \tag{4.36}$$

Avec:

- $C_{p_{moy}}$  : chaleur spécifique moyenne des fumées ;
- $C_{p_i}$  : chaleur spécifique du constituant i ;
- $Y_i$  : % molaire du constituant i.

Le débit des fumées est pris en kmole/h.

La chaleur spécifique de chaque constituant dépend de la température.

Nous avons utilisé le tableau A.1 de l'annexe A pour calculer la chaleur spécifique moyenne entre 0 et T°C en kcal/kmole.

### 4.11.1 Calcul des débits molaires des fumées

#### Four 100-F-101

Avec APH :

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 \text{ m}^3 \rightarrow 1371,138 \text{ m}^3 \\ 2788,88 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow X \text{ débit de la fumée} \end{array} \right.$$

$$X \text{ débit de la fumée} = \frac{2788,88 \times 1371,138}{100} = 38239,39345 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$n = \frac{38239,39345}{22.4} = 1707,1115 \text{ kmole/h}$$

Sans APH :

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 \text{ m}^3 \rightarrow 1368,48 \text{ m}^3 \\ 3050,2 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow X \text{ débit de la fumée} \end{array} \right.$$

$$X \text{ débit de la fumée} = \frac{3050,2 \times 1368,48}{100} = 41741,37696 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$n = \frac{41741,37696}{22.4} = 1863,4543 \text{ kmole/h}$$

#### Four 100-F-102

Avec APH :

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 \text{ m}^3 \rightarrow 1364,85 \text{ m}^3 \\ 2551,3 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow X \text{ débit de la fumée} \end{array} \right.$$

$$X_{\text{débit de la fumée}} = \frac{2551,3 \times 1364,85}{100} = 34821,41805 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$n = \frac{34821,41805}{22,4} = 1554,5275 \text{ kmole/h}$$

**Sans APH :**

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 \text{ m}^3 \rightarrow 1369,93 \text{ m}^3 \\ 2994,9 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow X_{\text{débit de la fumée}} \end{array} \right.$$

$$X_{\text{débit de la fumée}} = \frac{2994,9 \times 1369,93}{100} = 41028,03357 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$n = \frac{41028,03357}{22,4} = 1831,6086 \text{ kmole/h}$$

**Four 100-F-103**

**Avec APH :**

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 \text{ m}^3 \rightarrow 1366,30 \text{ m}^3 \\ 1795,3 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow X_{\text{débit de la fumée}} \end{array} \right.$$

$$X_{\text{débit de la fumée}} = \frac{1795,3 \times 1366,30}{100} = 24529,1839 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$n = \frac{24529,1839}{22,4} = 1095,0528 \text{ kmole/h}$$

**Sans APH :**

$$\left\{ \begin{array}{l} 100 \text{ m}^3 \rightarrow 1367,51 \text{ m}^3 \\ 2075,1 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow X_{\text{débit de la fumée}} \end{array} \right.$$

$$X_{\text{débit de la fumée}} = \frac{2075,1 \times 1367,51}{100} = 28377,20001 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$n = \frac{28377,20001}{22,4} = 1266,8392 \text{ kmole/h}$$

Les valeurs calculées sont notées dans le tableau suivant :

Tableau 4.13: Les débits molaires des fumées.

	Four 100-F-101	Four 100-F-102	Four 100-F-103
Débits avec APH	1707,1115 kmole/h	1554,5275 kmole/h	1095,0528 kmole/h
Débits sans APH	1863,4543 kmole/h	1831,6086 kmole/h	1266,8392 kmole/h

### 4.11.2 Calcul de la chaleur spécifique de chaque constituant

A partir des valeurs de l'annexe A, on peut calculer les valeurs de la chaleur spécifique moyenne avec et sans APH en utilisant la méthode de l'interpolation pour une valeur précise.

La Température des fumées à la sortie du préchauffeur d'air est de 170,2 °C.

#### Pour CO<sub>2</sub> :

T °C → Cp

100 → 9,17

170,2 → x

200 → 9,65

Interpolation → x = 9,50696 kcal/kmole. °C

#### Pour H<sub>2</sub>O :

T °C → Cp

100 → 8,03

170,2 → x

200 → 8,12

Interpolation → x = 8,09318 kcal/kmole. °C

#### Pour O<sub>2</sub> :

T °C → Cp

100 → 7,07

170,2 → x

200 → 7,15

Interpolation → x = 7,12616 kcal/kmole. °C

**Pour N<sub>2</sub>**

T °C → Cp

100 → 6,97

170,2 → x

200 → 7,00



Interpolation → x = 6,99106 kcal/kmole. °C

La Température des fumées à la sortie du four F101 est de 409,5 °C

**Pour CO<sub>2</sub> :**

T °C → Cp

400 → 10,40

409,5 → x

500 → 10,75



Interpolation → x = 10,43325 kcal/kmole. °C

**Pour H<sub>2</sub>O :**

T °C → Cp

400 → 8,34

409,5 → x

500 → 8,47



Interpolation → x = 8,35235 kcal/kmole. °C

**Pour O<sub>2</sub> :**

T °C → Cp

400 → 7,38

409,5 → x

500 → 7,49



Interpolation → x = 7,39045 kcal/kmole. °C

**Pour N<sub>2</sub>**

T °C → Cp

400 → 7,09

409,5 → x

500 → 7,15



Interpolation → x = 7,0957 kcal/kmole. °C

La Température des fumées à la sortie du Four F102 est de 392,5 °C

**Pour CO<sub>2</sub> :**

T °C → Cp

300 → 10,06

392,5 → x

400 → 10,40

Interpolation → x = 10,3745 kcal/kmole. °C

**Pour H<sub>2</sub>O :**

T °C → Cp

400 → 8,22

392,5 → x

400 → 8,34

Interpolation → x = 8,331 kcal/kmole. °C

**Pour O<sub>2</sub> :**

T °C → Cp

300 → 7,26

392,5 → x

400 → 7,38

Interpolation → x = 7,371 kcal/kmole. °C

**Pour N<sub>2</sub>**

T °C → Cp

300 → 7,04

392,05 → x

400 → 7,09

Interpolation → x = 7,03625 kcal/kmole. °C

La Température des fumées à la sortie du Four F103 est de 368,5 °C

**Pour CO<sub>2</sub> :**

T °C → Cp

300 → 10,06

368,5 → x

400 → 10,40

Interpolation → x = 10,2929 kcal/kmole. °C

**Pour H<sub>2</sub>O :**

T °C → Cp

300 → 8,22

368,5 → x

400 → 8,34

Interpolation → x = 8,3022 kcal/kmole. °C

**Pour O<sub>2</sub> :**

T °C → Cp

300 → 7,26

368,5 → x

400 → 7,38

Interpolation → x = 7,3422 kcal/kmole. °C

**Pour N<sub>2</sub>**

T °C → Cp

300 → 7,04

368,5 → x

400 → 7,09

Interpolation → x = 7,07425 kcal/kmole. °C

### 4.11.3 Calcul des quantités de chaleur perdues par les fumées dans les trois fours, avec préchauffeur d'air

Les quantités de chaleur perdues par les fumées dans les trois fours, avec préchauffeur d'air sont calculées suivant la formule (4.35), et les résultats de calcul sont reportées dans les tableaux 4.14 ; 4.15 et 4.16 :

**Four F101:**

*Application numérique pour le four F101 avec APH :*

$$Q_{\text{fumées}} = 1707,1115 \times 7,394655 \times (170,2 - 0)$$

$$Q_{\text{fumées}} = 2148519,8 \text{ kcal/h}$$

**Tableau 4.14:** Quantité de chaleur perdue par les fumées du Four F101 avec APH.

<b>Four F101</b>			
<b>Chaleur spécifique moyenne des fumées (<math>C_{p_{moy}}</math>)</b>			
Constituants	$C_{p_i}$ (kcal/kmole.°C)	$y_i$	$C_{p_i} \cdot y_i / 100$
CO <sub>2</sub>	9,50696	9,83	0,934534
H <sub>2</sub> O	8,09318	18,26	1,477815
O <sub>2</sub>	7,12616	0,6557	0,046726
N <sub>2</sub>	6,99106	71,24	4,980431
$C_{p_{moy}}$ (kcal/kmole. °C)			7,439506
<b>Quantité de chaleur perdue par les fumées (<math>Q_{fumées}</math>)</b>			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			170,2
Débit de gaz combustible (Nm <sup>3</sup> /h)			2788 ,88
Débit des fumées (kmoles/h)			1707,1115
$Q_{fumées}$ (kcal/h)			<b>2161551,27</b>

**Four F102:**

*Application numérique pour le four F102 avec APH :*

$$Q_{fumées} = 1554,5275 \times 7,439506 \times (170,2 - 0)$$

$$Q_{fumées} = 2161551,27 \text{ kcal/h}$$

**Tableau 4.15:** Quantité de chaleur perdue par les fumées du Four F102 avec APH.

<b>Four F102</b>			
<b>Chaleur spécifique moyenne des fumées (<math>C_{p_{moy}}</math>)</b>			
Constituants	$C_{p_i}$ (kcal/kmole.°C)	$y_i$	$C_{p_i} \cdot y_i / 100$
CO <sub>2</sub>	9,050696	9,87	0,893304
H <sub>2</sub> O	8,09318	18,34	1,484289
O <sub>2</sub>	7,12616	0,5636	0,040163
N <sub>2</sub>	6,99106	71,21	4,978334
$C_{p_{moy}}$ (kcal/kmole.°C)			7,39609
<b>Quantité de chaleur perdue par les fumées (<math>Q_{fumées}</math>)</b>			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			170,2
Débit de gaz combustible (Nm <sup>3</sup> /h)			2551,3
Débit des fumées (kmoles/h)			1554,5275
$Q_{fumées}$ (kcal/h)			<b>1956861,786</b>

**Four F103:**

*Application numérique pour le four F103 avec APH :*

$$Q_{fumées} = 1095,0528 \times 7,211155 \times (170,2 - 0)$$

$$Q_{fumées} = 1344000,55 \text{ kcal/h}$$

**Tableau 4.16:** Quantité de chaleur perdue par les fumées du Four F103 avec APH.

<b>Four F103</b>			
<b>Chaleur spécifique moyenne des fumées (<math>C_{p_{moy}}</math>)</b>			
Constituants	$C_{p_i}$ (kcal/kmole.°C)	$y_i$	$C_{p_i} \cdot y_i / 100$
CO <sub>2</sub>	9,050696	9,86	0,892399
H <sub>2</sub> O	8,09318	18,32	1,482671
O <sub>2</sub>	7,12616	0,584	0,041617
N <sub>2</sub>	6,99106	68,58	4,794469
$C_{p_{moy}}$ (kcal/kmole. °C)			7,211155
<b>Quantité de chaleur perdue par les fumées (<math>Q_{fumées}</math>)</b>			
T fumées sortie préchauffeur d'air (°C)			170,2
Débit de gaz combustible (Nm <sup>3</sup> /h)			1795,30
Débit des fumées (kmoles/h)			1095,0528
$Q_{fumées}$ (kcal/h)			<b>1344000,55</b>

Les valeurs calculées de Quantité de chaleur perdue par les fumées des trois fours avec APH sont reportées dans le tableau 4.17 :

**Tableau 4.17:** Quantité de chaleur perdue par les fumées dans les trois fours avec APH.

	<b>Four F101</b>	<b>Four F102</b>	<b>Four F103</b>
<b>Quantité de chaleur (kcal/h)</b>	2161551,27	1956861,786	1344000,55

Nous remarquons d'après la figure 4.4 que la quantité de chaleur perdue par les fumées dans le premier four était plus grande que celles perdues par les fumées dans les autres fours.

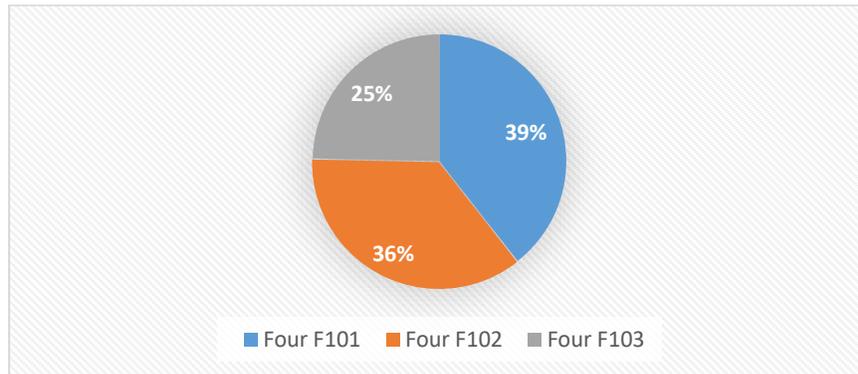


Figure 4.4 : Quantité de chaleur perdue par les fumées avec APH (kcal/h).

#### 4.11.4 Calcul des quantités de chaleur perdues par les fumées dans les trois fours, sans préchauffeur d'air

Les quantités de chaleur perdues par les fumées dans les trois fours, sans préchauffeur d'air sont calculées suivant la même formule utilisée précédemment (4.35) et les résultats de calcul sont reportées dans les tableaux 4.18 ; 4.19 et 4.20.

##### Four F101:

Tableau 4.18: Quantité de chaleur perdue par les fumées du Four F101 sans APH.

Four F101			
Chaleur spécifique moyenne des fumées ( $C_{p_{moy}}$ )			
Constituants	$C_{p_i}$ (kcal/kmole.°C)	$y_i$	$C_{p_i} \cdot y_i / 100$
CO <sub>2</sub>	10,43325	9,849	1,027571
H <sub>2</sub> O	8,35235	18,29	1,527645
O <sub>2</sub>	7,39045	0,6168	0,045584
N <sub>2</sub>	7,0957	71,23	5,054267
$C_{p_{moy}}$ (kcal/kmole.°C)			7,655067
Quantité de chaleur perdue par les fumées ( $Q_{fumées}$ )			
La Température des fumées à la sortie du four F101 (°C)			409,5
Débit de gaz combustible (Nm <sup>3</sup> /h)			3050,20
Débit des fumées (kmoles/h)			1863,4543
$Q_{fumées}$ (kcal/h)			<b>5841463,249</b>

*Application numérique pour le four F101 sans APH :*

$$Q_{\text{fumées}} = 1863,4543 \times 7,655067 \times (409,5 - 0)$$

$$Q_{\text{fumées}} = 5841463.249 \text{ kcal/h}$$

**Four F102:**

*Application numérique pour le four F102 sans APH :*

$$Q_{\text{fumées}} = 1831,6086 \times 7,601675 \times (392,5 - 0)$$

$$Q_{\text{fumées}} = 5464892,622 \text{ kcal/h}$$

**Tableau 4.19:** Quantité de chaleur perdue par les fumées du Four F102 sans APH.

<b>Four F102</b>			
<b>Chaleur spécifique moyenne des fumées (<math>C_{p_{\text{moy}}}</math>)</b>			
Constituants	$C_{p_i}$ (kcal/kmole.°C)	$y_i$	$C_{p_i} \cdot y_i / 100$
CO <sub>2</sub>	10,3745	9,83	1,019813
H <sub>2</sub> O	8,331	18,28	1,522907
O <sub>2</sub>	7,371	0,6381	0,047034
N <sub>2</sub>	7,03625	71,23	5,011921
$C_{p_{\text{moy}}}$ (kcal/kmole.°C)			7,601675
<b>Quantité de chaleur perdue par les fumées (<math>Q_{\text{fumées}}</math>)</b>			
La Température des fumées à la sortie du four F102 (°C)			392,5
Débit de gaz combustible (Nm <sup>3</sup> /h)			2994,90
Débit des fumées (kmoles/h)			1831,6086
$Q_{\text{fumées}}$ (kcal/h)			<b>5464892,622</b>

### Four F103:

Application numérique pour le four F103 sans APH :

$$Q_{\text{fumées}} = 1266,8392 \times 7,616464 \times (368,5 - 0)$$

$$Q_{\text{fumées}} = 355595,757 \text{ kcal/h}$$

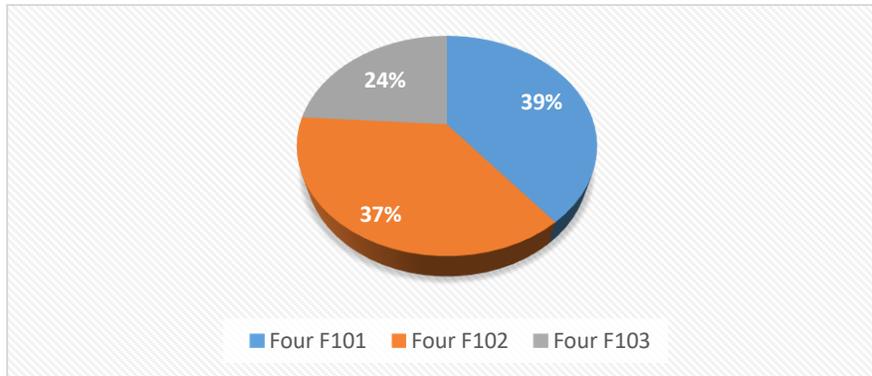
**Tableau 4.20:** Quantité de chaleur perdue par les fumées du Four F103 sans APH.

<b>Four F103</b>			
<b>Chaleur spécifique moyenne des fumées (<math>C_{p\text{moy}}</math>)</b>			
Constituants	$C_{p_i}$ (kcal/kmole.°C)	$y_i$	$C_{p_i} \cdot y_i / 100$
CO <sub>2</sub>	10,2929	9,85	1,013851
H <sub>2</sub> O	8,3022	18,31	1,520133
O <sub>2</sub>	7,3422	0,602	0,0442
N <sub>2</sub>	7,07425	71,22	5,038281
$C_{p\text{moy}}$ (kcal/kmole.°C)			7,616464
<b>Quantité de chaleur perdue par les fumées (<math>Q_{\text{fumées}}</math>)</b>			
La Température des fumées à la sortie du four F103 (°C)			368,5
Débit de gaz combustible (Nm <sup>3</sup> /h)			2075,10
Débit des fumées (kmoles/h)			1266,8392
$Q_{\text{fumées}}$ (kcal/h)			<b>355595,757</b>

Les valeurs calculées de Quantité de chaleur perdue par les fumées des trois fours sans APH sont reportées dans le tableau suivant :

**Tableau 4.21:** Quantité de chaleur perdue par les fumées dans les trois fours sans APH.

	<b>Four F101</b>	<b>Four F102</b>	<b>Four F103</b>
<b>Quantité de chaleur (kcal/h)</b>	5841463,249	5464892,622	3555595,757

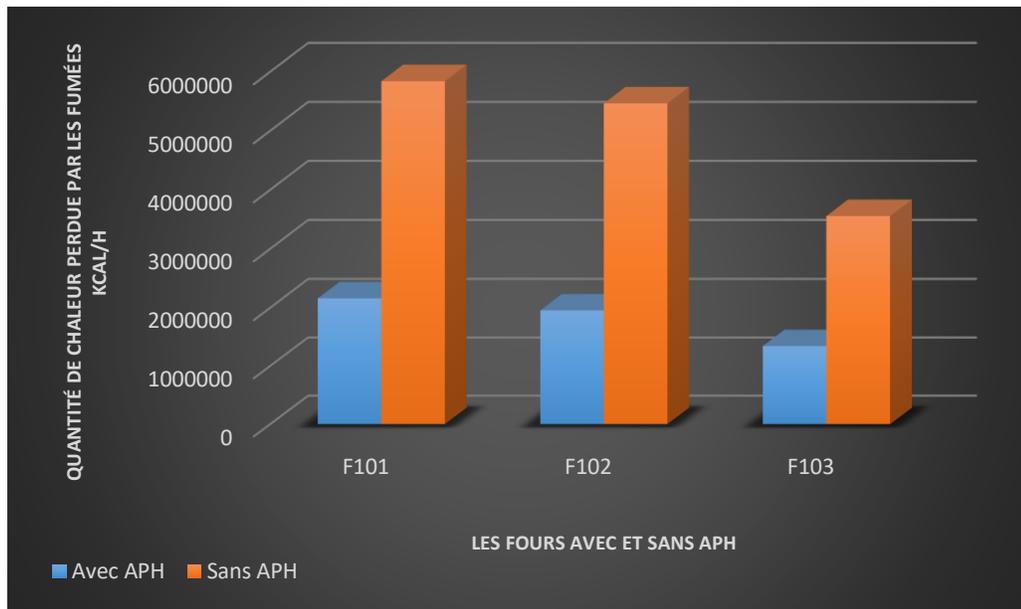


**Figure 4.5 :** Quantité de chaleur perdue par les fumées sans APH (kcal/h).

Nous remarquons d'après la figure 4.5 que la quantité de chaleur perdue par les fumées dans le premier four était également plus grande que celles perdues par les fumées dans les deux autres fours. Les valeurs de Quantité de chaleur perdue par les fumées des trois fours avec et sans APH sont reportées dans le tableau 4.22.

**Tableau 4.22:** Tableau récapitulatif des valeurs de la quantité de chaleur perdue par les fumées.

<b>Fours</b>	<b>Q<sub>fumées</sub> (kcal/h)</b>	
	<b>Avec APH</b>	<b>Sans APH</b>
F101	2161551,27	5841463,249
F102	1956861,786	5464892,622
F103	1344000,55	3555595,757



**Figure 4.6 :** Quantité de chaleur perdue par les fumées avec et sans APH dans les trois fours (kcal/h).

Ces résultats ont été représentés graphiquement (figure 4.6), nous concluons que l'appareil APH diminue la quantité de chaleur perdue par la fumée, ce qui indique que la technologie APH maintient la chaleur générée par la combustion.

#### 4.12 Quantité de chaleur perdue par les parois

Les fours du complexe topping condensât sont récents, par conséquent, les matériaux d'isolation thermique (briques réfractaires) sont en bon état. La quantité de chaleur perdue par les parois peut être estimée à 2% de la quantité de chaleur libérée par la combustion et nous l'avons mentionné au début.

Pour calculer la quantité de chaleur perdue par les parois on a utilisé la formule suivante :

$$Q_{\text{parois}} = 2 \% Q_{\text{fournie}} \text{ (kcal/h)} \tag{4.38}$$

*Application numérique :*

**Avec APH:**

**F101:**

$$Q_{\text{parois}} = 2 \% Q_{\text{fournie}} \text{ (kcal/h)}$$

$$Q_{\text{parois}} = 0,02 \times 30007951,58$$

$$Q_{\text{parois}} = \mathbf{600159,0316 \text{ kcal/h}}$$

**F102:**

$$Q_{\text{parois}} = 2 \% Q_{\text{fournie}} \text{ (kcal/h)}$$

$$Q_{\text{parois}} = 0,02 \times 27451624,62$$

$$Q_{\text{parois}} = \mathbf{549032,4924 \text{ kcal/h}}$$

**F103:**

$$Q_{\text{parois}} = 2 \% Q_{\text{fournie}} \text{ (kcal/h)}$$

$$Q_{\text{parois}} = 0,02 \times 19317172,3$$

$$Q_{\text{parois}} = \mathbf{386343,446 \text{ kcal/h}}$$

**Sans APH :**

**F101:**

$$Q_{\text{parois}} = 2 \% Q_{\text{fournie}} \text{ (kcal/h)}$$

$$Q_{\text{parois}} = 0,02 \times 32819717,65$$

$$Q_{\text{parois}} = \mathbf{656394,353 \text{ kcal/h}}$$

**F102:**

$$Q_{\text{parois}} = 2 \% Q_{\text{fournie}} \text{ (kcal/h)}$$

$$Q_{\text{parois}} = 0,02 \times 32224697,44$$

$$Q_{\text{parois}} = \mathbf{644493,9488 \text{ kcal/h}}$$

**F103:**

$$Q_{\text{parois}} = 2 \% Q_{\text{fournie}} \text{ (kcal/h)}$$

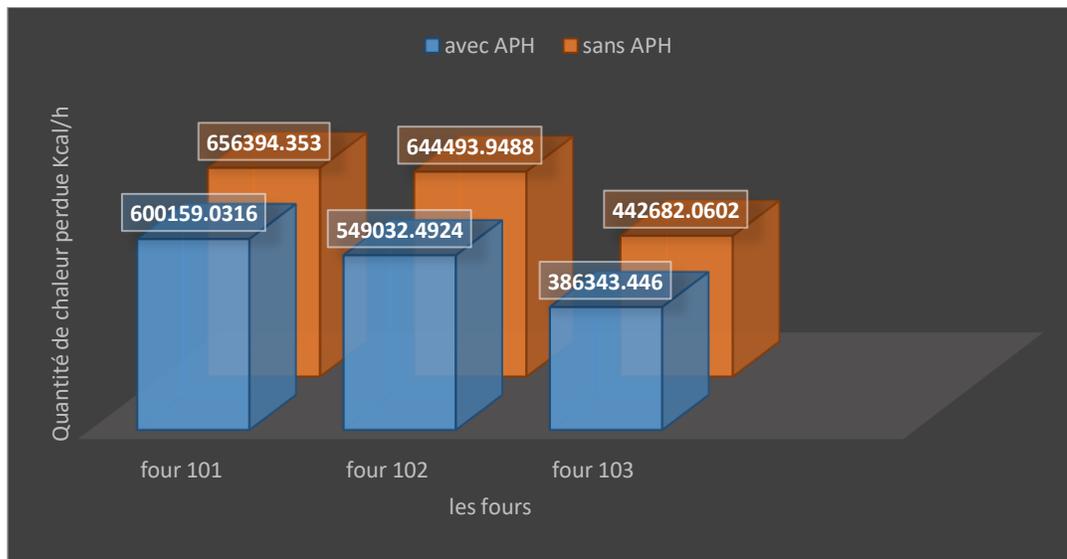
$$Q_{\text{parois}} = 0,02 \times 22134103,01$$

$$Q_{\text{parois}} = \mathbf{442682,0602 \text{ kcal/h}}$$

Les valeurs calculées de quantité de chaleur perdue par les parois des trois fours avec et sans APH sont reportées dans le tableau 4.23.

**Tableau 4.23:** Quantité de chaleur perdue par les parois dans les trois fours avec et sans APH.

Fours	Avec APH	Sans APH
F101	600159,0316 kcal/h	656394,353 kcal/h
F102	549032,4924 kcal/h	644493,9488 kcal/h
F103	386343,446 kcal/h	442682,0602 kcal/h



**Figure 4.7 :** Quantité de chaleur perdue par les parois dans les trois fours avec et sans APH.

D'après la figure 4.7, nous remarquons que la chaleur perdue par les parois dans le four F101 dans les deux cas est relativement proche, mais dans les fours F102 et F103 il y a une variation de perte de chaleur sans APH plus grande qu'elle ne l'est par APH avec une différence notable.

### 4.13 Calcul du rendement thermique

Le calcul du rendement a été effectué à partir de l'équation 4.2.

#### Avec APH:

**F101:**

$$\eta = \frac{30007951,58 - 2161551,27 - 600159,0316}{30007951,58} \times 100 = 90,79 \%$$

**F102:**

$$\eta = \frac{27451624,62 - 1956861,786 - 386343,446}{27451624,62} \times 100 = 91,46 \%$$

**F103:**

$$\eta = \frac{19317172,3 - 1344000,55 - 386343,446}{19317172,3} \times 100 = 91,04 \%$$

#### Sans APH :

**F101:**

$$\eta = \frac{32819717,65 - 5841463,249 - 656394,353}{32819717,65} \times 100 = 80,20 \%$$

**F102:**

$$\eta = \frac{32224697,44 - 5464892,622 - 644493,9488}{32224697,44} \times 100 = 81,04 \%$$

**F103:**

$$\eta = \frac{22134103,01 - 3555595,757 - 442682,0602}{22134103,01} \times 100 = 81,93 \%$$

Les valeurs calculées de rendement des trois fours avec et sans APH sont reportées dans le tableau 4.24 :

**Tableau 4.24:** Les valeurs du rendement thermique de chaque four.

Fours	Rendement thermique (%)	
	Avec préchauffeur d'air	Sans préchauffeur d'air
F101	90,79	80,20
F102	91,46	81,04
F103	91,04	81,93

Nous avons représenté les rendements thermiques sans et avec préchauffeur pour chaque four graphiquement (figure 4.8), nous remarquons que le rendement thermique sans le préchauffeur d'air dans les fours F103, F02, F101 est entre 80% et 82% par contre en présence de préchauffeur il est plus élevé, d'ailleurs on remarque selon le graphe qu'on peut atteindre les 90 % dans le four F101 ; 91,46% dans le four F102 et 91,04% au niveau du four F103.

On conclut donc que l'appareil APH augmente le rendement avec un pourcentage de 10% en diminuant la quantité de chaleur perdue.

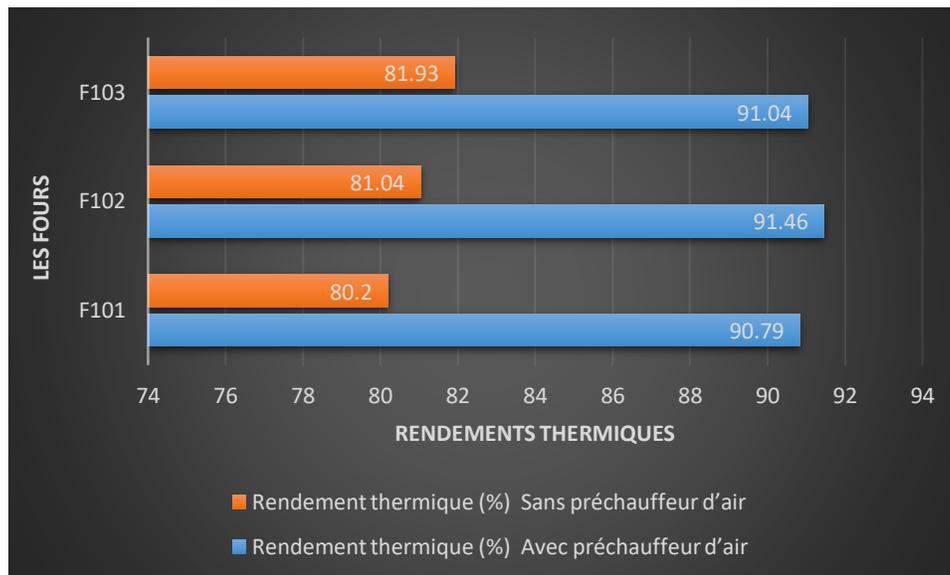


Figure 4.8 : Les rendements thermiques de chaque four.

### 4.14 Calcul de l'énergie récupérée

D'après les résultats de calcul, la différence entre la consommation du combustible ( $\Delta V_v$ ) avec et sans préchauffeur d'air est :

$$\Delta V_v = V_{vs} - V_{va} \quad (4.39)$$

$V_{va}$  : débit du combustible consommé par les trois fours fonctionnant avec APH.

$V_{vs}$  : débit du combustible consommé par les trois fours fonctionnant sans APH.

Calculons les débits de combustibles consommés par les trois fours

#### a) les trois fours fonctionnant avec APH

$$V_{va} = 2788,88 + 2551,3 + 1795,30$$

$$V_{va} = 7135,48 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

b) les trois fours fonctionnant sans APH

$$V_{vs} = 3050,20 + 2994,90 + 2075,10$$

$$V_{vs} = 8120,20 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Nous avons :

$$V_{va} = 7135,48 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$V_{vs} = 8120,20 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

A partir de l'équation (4.39) nous calculons  $\Delta V_v$  :

$$\Delta V_v = 7135,48 - 8120,20$$

$$\Delta V_v = 984,72 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Alors nous calculons  $\Delta V_v$  pour un an :

$$\Delta V_v = 984,72 \times 24 \times 365$$

$$\Delta V_v = 8626147,20 \text{ Nm}^3/\text{an}$$

La quantité d'énergie récupérée est comme suit :

$$Q_{\text{récupérée}} = \Delta V_v \cdot \text{PCI} \tag{4.40}$$

$$Q_{\text{récupérée}} = 10759,85757 \times 8626147,20$$

$$Q_{\text{récupérée}} = 9,2816 \times 10^{10} \text{ kcal/an}$$

### 4.15 Calcul du gain d'argent

On peut calculer le gain d'argent comme suit :

$$G = \Delta V_v \cdot P \tag{4.41}$$

Avec :

G : le gain d'argent

P : le prix actuel du gaz naturel

En connaissant le prix actuel du gaz naturel  $P = 5,80 \text{ DA/Nm}^3$

Donc:

$$G = 8626147,20 \times 5,80$$

$$G = 50031653,76 \text{ DA/an}$$

Donc le gain d'argent durant un an est égal à **50031653,76 DA/an**.

Dans notre APH il y a deux ventilateurs A et B de tirage fonctionnant avec de l'énergie électrique, nous avons calculé le gain de cette énergie. Pendant un mois, le ventilateur A ou B consomme environ de 250 KW/mois d'électricité.

Nous prenons le prix d'un kilowatt à cette valeur :  $1\text{KW} = 136,62 \text{ DA}$

Donc : le prix de la puissance absorbée par un ventilateur =  $250 \times 136,62 = 34155 \text{ DA}$

Durant une année, elle coutera =  $34155 \times 12 = 409860 \text{ DA}$

Pour que l'APH fonctionne, les deux ventilateurs doivent travailler ensemble, donc nous allons calculer le prix pour les deux ventilateurs comme suit :

Le prix de la puissance absorbée par les deux ventilateurs =  $409860 \times 2 = 819720 \text{ DA}$

Le gain d'argent réel =  **$50031653,76 - 819720 = 49211933,76 \text{ DA}$**

**49211933,76 DA**

### 4.16 Discussion des résultats

Grâce à notre étude et sur la base des résultats expérimentaux obtenus dans ce chapitre nous allons essayer d'interpréter nos résultats. Cette interprétation nous permettra de mieux comprendre le rôle et l'importance de l'APH dans les fours tubulaires.

D'après les résultats de calcul et les chiffres obtenus, nous avons remarqué que les rendements des trois fours lors de l'utilisation de la technologie APH, qui sont pour le four F101 : 90,79 %, pour le four F102 : 91,46%, et pour le four F103 : 91,04 %, sont plus élevés que les rendements des trois fours sans l'utilisation de la technologie APH, qui sont comme suit pour le four F101 : 80,20 %, pour le four F102 : 81,04%, et pour le four F103 : 81,93 %.

Notons aussi que la quantité d'énergie perdue récupérée par la technologie APH utilisée dans les trois fours, qui est estimée à  $9,2816 \times 10^{10} \text{ kcal/an}$ , a permis à l'usine d'économiser une quantité de  $8626147,20 \text{ Nm}^3/\text{an}$  de gaz naturel et c'est un grand nombre à prendre en considération parce que son coût est estimé annuellement à **49211933,76 DA**.

Cette différence de rendement de 10% est l'énergie que nous avons récupérée, elle est due au contrôle de la perte d'énergie par les fumées en utilisant la technologie APH, qui a fourni un grand soutien au facteur environnemental et économique en maintenant la chaleur dans la chambre de combustion à l'intérieur du four.

### 4.17 Les Avantages et les inconvénients du préchauffage de l'air

Il est connu qu'en réalité appliqué ou en d'autres termes dans le vrai visage de l'industriel il n'y a pas de processus ou de dispositif qui fonctionne efficacement ou est parfait, pour chaque processus ou dispositif il y a des avantages et des inconvénients et à travers l'étude que nous avons effectuée nous pouvons identifier les avantages et les inconvénients de l'appareil APH.

#### 4.17.1 Les Avantages

- Augmentation du rendement thermique en renvoyant la fumée et en l'utilisant pour chauffer l'air de combustion.
- Réduction de la perte d'énergie en exploitant la chaleur de la fumée.
- Amélioration de la réaction de combustion entre l'air et le gaz de combustion.
- Augmentation de l'exhaustivité de la combustion, réduisant ainsi la production de déchets et des suies.
- Amélioration du transfert de chaleur vers la charge de procédé.
- Augmentation de la température de flamme dans la chambre de la combustion.
- Réduction de la pollution par la diminution de la consommation du gaz combustible.
- Réduction du risque d'émission de NOx en refroidissant la fumée, mais une fois refroidi,

Il y a deux choses à considérer :

- 1) La température du métal de tuyau devrait être 10°C plus élevée que la rosée de la fumée.
- 2) Le point de rosée des effluents gazeux égale 143°C.
- 3) Si la température des effluents gazeux dans la fumée est inférieure à 143°C, le passage inférieur à l'air froid doit être ouvert pour protéger les tuyaux de la corrosion.

Ceci est confirmé par le rapport d'analyse effectué par le laboratoire de qualité (Annexe B.1) à travers un dispositif dans la buse de la cheminée conformément à la loi d'émission

atmosphérique le 16 avril 2006 publié dans le Journal officiel de la république Algérienne N24 (Annexe B.2).

## 4.17.2 Les inconvénients

Comme l'APH a de nombreux avantages, il est naturel d'avoir quelques inconvénients qui sont les suivants:

- 1) Le préchauffeur d'air s'endommage facilement si on lui manque d'entretien et ses pièces de rechange sont chères.
- 2) Le coût de maintenance est plus élevé.
- 3) L'augmentation de la température de flamme dans la chambre de combustion est le principal facteur de la formation de NOx.
- 4) L'air de combustion peut être chauffé à environ 400 °C, mais en dépassant ce degré, le NOx est formé et pour l'élever au-dessus de 400°C ça nécessite quelques interventions d'ingénierie et certains dispositifs, et donc le principal problème reste l'émission de NOx.



# *Conclusion générale*



## Conclusion générale

Le principal problème dans l'ancienne conception des fours utilisés dans l'industrie de raffinage est l'aspect environnemental et la consommation excessive de gaz naturel avec faible rendement et c'est pourquoi la majorité des recherches scientifiques réalisées actuellement sont réalisées sous les contraintes économie d'énergie et protection de l'environnement.

Mais il y a une nouvelle technologie qui consiste à connecter les prises de fumée de four à un échangeur de chaleur appelé préchauffeur d'air, cette technologie fournit un excellent ajout à l'ancienne conception des fours tubulaires car ça augmente le rendement thermique des fours et résout le problème des émissions de NO<sub>x</sub>, principale cause des pluies acides.

Le problème que nous avons constaté dans le complexe RA2K c'est le manque d'intérêt pour l'appareil de préchauffeur d'air en termes de maintenance sur le terrain et quand il n'est pas maintenu, il a un dysfonctionnement qui peut rester pendant des mois en raison de l'importation lente de pièces de rechange de l'étranger ; les plus importants problèmes causés par le manque de facteur d'entretien sont mentionnés dans les points suivants :

- Le préchauffeur de l'air de combustion a deux bypass, l'un pour l'air et l'autre pour les fumées. Ces 2 bypass ont des vannes automatiques (Hv1703 et Hv1704) qui sont commandées par le fonctionnement des ventilateurs d'extraction des fumées d'une manière automatique mais il y a un lien entre les vannes et les ventilateurs, ce lien fonctionne comme suit : lorsque les deux ventilateurs sont actifs, les deux vannes se ferment, et lorsque seulement l'un des ventilateurs est actif, les deux vannes s'ouvrent.
- Après une période de fonctionnement de l'APH, la vanne permet à la majeure partie de la fumée de passer directement à la cheminée. Ce trafic rencontre le processus de refroidissement des fumées qui sont envoyées dans l'atmosphère, et provoque les ventilateurs APH, qui extraient de la fumée, et seraient perturbés en raison de l'écoulement insuffisant, ce problème provoque l'arrêt de l'APH, et par suite son isolement du four et l'air de combustion sera envoyé directement aux brûleurs.

- L'APH sera également désactivé en raison de l'absence de travaux de nettoyage interne pour les coutures de charbon laissées par la fumée dans les tuyaux ainsi qu'à l'intérieur de l'APH lui-même. Il en résulte l'émergence du phénomène de corrosion.

Et lorsque l'APH est perturbé, certains problèmes seront causés, tels que :

- ✚ Les pertes de calories par les parois des trois fours.
- ✚ La haute température de sortie des fumées accompagnées d'émissions de NOx qui affectent la nature.
- ✚ Mauvais contrôle de la combustion dans les trois fours.

Le problème dans l'unité RA2K Skikda est l'utilisation irrégulière de l'APH en raison du manque d'attention et de l'entretien périodique, ce qui ne le rend pas en service pendant plusieurs mois.

Dans la présente étude et en calculant le rendement énergétique des trois fours en présence et en absence du dispositif APH on a pu montrer la différence importante qui existe entre les deux cas ainsi que la capacité de l'APH à élever le rendement des fours.

Espérons que la détermination du taux des bénéfiques que le complexe RA2K gagnera à travers l'économie dans la quantité de gaz de combustion sensibilisera les responsables du complexe Topping RA2K Skikda à la nécessité d'assurer l'entretien régulier du préchauffeur d'air pour éviter son arrêt de service, dans ce but plusieurs réponses illustrées sous forme de résultats de calcul concrets leurs ont été fournis par cette étude, y compris :

- ✚ Augmentation du rendement du four jusqu'à 91,46% par un pourcentage de **10%** ;
- ✚ Diminution de la température des fumées de **394,2 à 170,2 °C** ;
- ✚ Gain en combustible de **8626147,20 Nm<sup>3</sup>/an** ;
- ✚ Gain d'argent de **49211933,76 DA** ;
- ✚ Le plus important est d'appliquer et de respecter les lois environnementales en réduisant les émissions de gaz toxiques pour préserver l'environnement.

## Références Bibliographiques

- [1] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/petrole-le-raffinage/>
- [2] <https://www.connaissancedesenergies.org/quappelle-t-les-condensats-de-gaz-naturel-150709>
- [3] Benlagha Ahmed, Setti Amine : « optimisation des paramètres opératoires relatifs à la section de stabilisation en vue de récupérer le maximum de produits finis (GPL, condensât) », Biskra, Juin 2012.
- [4] René cossé, «Technique d'exploitation pétrolière Le gisement, Editions Technip », 27 rue Ginoux, 75737 Paris cedex 15, France, 1988.
- [5] A.Rojey, B.Durand, C.Jaffret, S.Jullian, M.Valais, « Le gaz naturel production traitement transport », Editions Technip, Paris, 1994.
- [6] <https://www.slideshare.net/rafrac6008/licence-hrm>
- [7] Résumé des journées scientifique et techniques. Alger. Avril 1998.
- [8] Manuel d'opération unité 100 document No.: SC1-900-MU-PR-0003, Sonatrach.
- [9] James H.Gary, Glenn E. Handwerk, « Petroleum Refining Technology and Economics », Fourth Edition, New York • Basel, 2001.
- [10] Mémoire Descriptif des installations RA2K\_Rev2\_18-5-2013, Sonatrach.
- [11] [https://en.wikipedia.org/wiki/Petroleum\\_naphtha](https://en.wikipedia.org/wiki/Petroleum_naphtha)
- [12][https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Naphta?fbclid=IwAR0s1MMf\\_Rlc8UKYyA0q1gQO2EQwYvPY24hIwpoV-1leMtLnz9IPuQX5MR0](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Naphta?fbclid=IwAR0s1MMf_Rlc8UKYyA0q1gQO2EQwYvPY24hIwpoV-1leMtLnz9IPuQX5MR0)
- [13] Jean-Pierre Wauquier, « raffinage du pétrole, pétrole brute produits pétrolières schémas de fabrications », Editions Technip, Paris, 1994.
- [14] <https://www.britannica.com/science/kerosene>.
- [15] <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/K%C3%A9ros%C3%A8ne>

- [16] Mouhamed A.Fahim, Taher A.Alsahhaf, Amal Elkilani: « Fundamentals of petroleum refining», First edition 2010, Elsevier B.V, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK Radarweg 29, PO Box 211, 1000 AE Amsterdam, The Netherlands,2010.
- [17] <http://fr.scienceaq.com/Chemistry/100102068.html>
- [18] <https://www.aquaportail.com/definition-13058-point-de-congelation.html>
- [19][http://samuel.benoit.online.fr/fr/gazole-gas-oil-gasoil-combustible-automobile-petrole-derivemoteurdiesel?fbclid=IwAR0t9xYvVAgjKnx8GbnPNGiaTDSq2w5S\\_m2Vqsczf3E5hK11AjaHX1OTyE](http://samuel.benoit.online.fr/fr/gazole-gas-oil-gasoil-combustible-automobile-petrole-derivemoteurdiesel?fbclid=IwAR0t9xYvVAgjKnx8GbnPNGiaTDSq2w5S_m2Vqsczf3E5hK11AjaHX1OTyE)
- [20] [https://wiki.factorio.com/Light\\_oil](https://wiki.factorio.com/Light_oil)
- [21] <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01614948408064721>
- [22] <https://dictionary.babylon-software.com/heavy%20fuel%20oil/>
- [23] <https://www.petropedia.com/definition/38/heavy-oil>
- [24] Bennara Imad: « Etude de l'impact de l'encrassement et la dégradation des tubes sur les performances de l'échangeur 100-E-115A/B », Boumerdès, Août 2017.
- [25] Boudjadi Mohamed Amir,Bousbaa Zakaria: « Calcul du Topping de condensat (Colonne T101 et T103) de la RA2K de Skikda », Boumerdes ,2013.
- [26] Bouhala Noureddine: « Calcul vérificatif et dimensionnement de la batterie d'aéroréfrigérant A-106 A/F », Boumerdes, Avril 2017.
- [27] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Distillation\\_du\\_p%C3%A9trole](https://fr.wikipedia.org/wiki/Distillation_du_p%C3%A9trole).
- [28] Boudjadi Mohamed Amir: « Etude du Rendement Thermique des Fours avec et sans la mise en service du préchauffeur d'air (Raffinerie de Condensat RA2K) », Avril 2017
- [29] Koller k, « aide-mémoire de génie chimique, 4eme édition » Dunod, Paris, 2001, 2005, 2010, 2013.
- [30] Koller k, « aide-mémoire de génie chimique, 3eme édition » Dunod, Paris, 2001, 2005, 2009.
- [31] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/raffinage-petrolier>.

- [32] P. WUITHIER, « Le pétrole Raffinage et génie chimique », TOME-2-Edition TECHNIP, Paris, 1972.
- [33] [https://oer2go.org/mods/fr-wikipedia-static/content/a/transfert\\_thermique.html](https://oer2go.org/mods/fr-wikipedia-static/content/a/transfert_thermique.html)
- [34] Jean-Luc Battaglia, Andrzej Kusiak, Jean-Rodolphe Puiggali, « Introduction aux transferts thermiques, Cours et exercices corrigés », Dunod, Paris, 2010.
- [35] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert\\_thermique#Rayonnement](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique#Rayonnement).
- [36] J.P. Moulin, « Génie des Procédés génie chimique réacteurs chimiques échangeurs de chaleur échangeur de matière», Ecole centrale Paris, 2004/2005.
- [37] Daniel morvan, Frédéric Rousseau, « GÉNIE DES PROCEDES, Processus de transfert, Transferts massiques, dynamiques et énergétiques Cours et exercices corrigés (niveau C) », Ellipses Édition Marketing S.A, Paris, 2015.
- [38] Jean Taine, Franck Enguehard, Estelle lacona, «Transferts thermiques Introduction aux transferts d'énergie, Cours et exercices d'application, 5<sup>ème</sup> édition», Dunod, Paris, 1991, 1998, 2003, 2008, 2014.
- [39] <http://ilm-perso.univ-lyon1.fr/~asmiguel/teaching/Thermodynamique/thermo11.pdf>
- [40] J.Le Noguès, « Etude des fours pétroliers et pétrochimiques», Editions Technip, paris, 1974.
- [41] <https://selectra.info/energie/guides/comprendre/pouvoir-calorifique>
- [42] [http://www.azprocede.fr/Cours\\_GC/combustion\\_equation.html](http://www.azprocede.fr/Cours_GC/combustion_equation.html)
- [43] [http://www.azprocede.fr/Cours\\_GC/combustion\\_fours.html](http://www.azprocede.fr/Cours_GC/combustion_fours.html)
- [44] Pierre Trambouze, « Le Raffinage du pétrole - Tome 4 - Matériels et équipements », Édition Technip, Paris, 1999.
- [45] R.Borghi, M.Destriau, « la combustion et les flammes », Édition Technip, Paris, 1995.
- [46] Techniques de l'Ingénieur Réf : BE8842 v1
- [47] Edmond Perthuis, « la Combustion industrielle », Édition Technip, Paris, 1983.

[48] Total, équipements réchauffeurs et fours, manuel de formation cours EXP-PR-EQ110-FR  
Révision 0.1, version 08/06/2007.

# Annexe A

**Tableau A.1:** Chaleur spécifique moyenne des fumées [32].

CHALEUR SPÉCIFIQUE MOYENNE ENTRE 0°C ET t°C en kcal (°C)<sup>-1</sup> (k.mole)<sup>-1</sup>

t°C	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> O <sub>v</sub>	CO <sub>2</sub>
100	6,92	6,97	7,05	6,97	8,03	9,17
200	6,95	7,00	7,15	7,00	8,12	9,65
300	6,97	7,04	7,26	7,06	8,22	10,06
400	6,98	7,09	7,38	7,12	8,34	10,40
500	6,99	7,15	7,49	7,19	8,47	10,75
600	7,01	7,21	7,59	7,27	8,60	11,03
700	7,03	7,27	7,68	7,34	8,74	11,28
800	7,06	7,35	7,77	7,43	8,89	11,50
900	7,09	7,42	7,85	7,50	9,04	11,70
1 000	7,12	7,49	7,92	7,57	9,18	11,88
1 100	7,15	7,56	7,98	7,64	9,32	12,05
1 200	7,20	7,62	8,04	7,70	9,45	12,19
1 300	7,24	7,67	8,11	7,76	9,58	12,32
1 400	7,28	7,73	8,16	7,81	9,72	12,45
1 500	7,32	7,78	8,20	7,85	9,84	12,56
1 600	7,36	7,82	8,24	7,90	9,96	12,66
1 700	7,40	7,86	8,28	7,94	10,09	12,75
1 800	7,45	7,91	8,33	7,98	10,20	12,84
1 900	7,49	7,94	8,38	8,02	10,30	12,92
2 000	7,53	7,98	8,42	8,05	10,41	12,99
2 100	7,57	8,01	8,45	8,09	10,52	13,06
2 200	7,62	8,05	8,48	8,12	10,61	13,13
2 300	7,66	8,08	8,52	8,15	10,71	13,19
2 400	7,70	8,10	8,56	8,18	10,79	13,24
2 500	7,74	8,14	8,59	8,21	10,87	13,30

D'après E. Justi et H. Lüder. *Forsch. Gebiete Ingenieur*, 6, 211, 1935.

# Annexe B

Annexe B.1 : le rapport d'analyse effectuée par le laboratoire du contrôle de qualité RA2K.

 <b>سوناتراش</b> Sonatrach	Activité LRP Pôle RAFF Raffinerie RA2K Département Technique Service Laboratoire	<h2>RAPPORT D'ESSAI</h2>		
Date :	24/02/2020			
N° de rapport d'essais				
Échantillon :	Fumée du Four 100-F-103			
Analyses	UNITES	NORMES	Résultats	Observation
O <sub>2</sub>	%	Méthodes Electrochimiqu e	13.09	
CO <sub>2</sub>	%		4.54	
CO	mg/m <sup>3</sup>		14.00	
NO	mg/m <sup>3</sup>		93.60	
NO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>		2.80	
SO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>		0.00	
H <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>		0.00	
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup>		146.10	
<b>Sonatrach / Activité AVAL / Pôle Raffinage</b> Sonatrach Activité LRP Djenane El Malik Hydra Alger Algérie Tél : 213 021 54 80 11 - Fax 213 021 54 66 18		<b>Raffinerie RA2K</b> BP 363 – Skikda Tél : 030 92 56 93 Fax : 030 92 50 67		
<b>Le Chef de Service Laboratoire:</b>				

N° 24		Dimanche 17 Rabie El Aouel 1427	
45ème ANNEE		Correspondant au 16 avril 2006	
			
<p>الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية</p> <h1 style="text-align: center;">الجريدة الرسمية</h1> <p style="text-align: center;">اتفاقات دولية ، قوانين ، ومراسيم قرارات وآراء ، مقررات ، منشور ، إعلانات و بلاغات</p>			
<p><b>JOURNAL OFFICIEL</b> DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE CONVENTIONS ET ACCORDS INTERNATIONAUX - LOIS ET DECRETS ARRETES, DECISIONS, AVIS, COMMUNICATIONS ET ANNONCES (TRADUCTION FRANÇAISE)</p>			
<b>ABONNEMENT ANNUEL</b>	Algérie Tunisie Maroc Libye Mauritanie	ETRANGER (Pays autres que le Maghreb)	DIRECTION ET REDACTION SECRETARIAT GENERAL DU GOUVERNEMENT WWW. JORADP. DZ Abonnement et publicité: IMPRIMERIE OFFICIELLE Les Vergers, Bir-Mourad Raïs, BP 376 ALGER-GARE Tél : 021.54.35.06 à 09 021.65.64.63 Fax : 021.54.35.12 C.C.P. 3200-50 ALGER TELEX : 65 180 IMPOF DZ BADR: 060.300.0007 68/KG ETRANGER: (Compte devises) BADR: 060.320.0600 12
	<b>1 An</b>	<b>1 An</b>	
	Edition originale.....	<b>1070,00 D.A</b>	
Edition originale et sa traduction.....	<b>2140,00 D.A</b>	<b>5350,00 D.A</b> (Frais d'expédition en sus)	
Edition originale, le numéro : 13,50 dinars. Edition originale et sa traduction, le numéro : 27,00 dinars. Numéros des années antérieures : suivant barème. Les tables sont fournies gratuitement aux abonnés. Prière de joindre la dernière bande pour renouvellement, réclamation, et changement d'adresse. Tarif des insertions : 60,00 dinars la ligne			

## DECRETS

**Décret exécutif n° 06-138 du 16 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 15 avril 2006 réglementant l'émission dans l'atmosphère de gaz, fumées, vapeurs, particules liquides ou solides, ainsi que les conditions dans lesquelles s'exerce leur contrôle.**

-----  
Le Chef du Gouvernement,

Sur le rapport du ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement,

Vu la Constitution, notamment ses articles 85-4° et 125 (alinéa 2) ;

Vu la loi n° 90-08 du 7 avril 1990, complétée, relative à la commune ;

Vu la loi n° 90-09 du 7 avril 1990, complétée, relative à la wilaya ;

Vu la loi n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable ;

Vu la loi n° 04-04 du 5 Joumada El Oula 1425 correspondant au 23 juin 2004 relative à la normalisation ;

Vu la loi n° 05-07 du 19 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 28 avril 2005 relative aux hydrocarbures ;

Vu le décret présidentiel n° 04-136 du 29 Safar 1425 correspondant au 19 avril 2004 portant nomination du Chef du Gouvernement ;

Vu le décret présidentiel n° 05-161 du 22 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 1er mai 2005 portant nomination des membres du Gouvernement ;

Vu le décret exécutif n° 93-165 du 10 juillet 1993, complété, réglementant les émissions atmosphériques de fumées, gaz, poussières, odeurs et particules solides des installations fixes ;

### **Décète :**

Article 1er. — En application des dispositions de l'article 47 de la loi n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003, susvisée, le présent décret a pour objet de réglementer l'émission dans l'atmosphère de gaz, fumées, vapeurs, particules liquides ou solides, ainsi que les conditions dans lesquelles s'exerce leur contrôle.

### SECTION 1

#### DES DISPOSITIONS PRELIMINAIRES

Art. 2. — Au sens du présent décret on entend par émission dans l'atmosphère de gaz, fumées, vapeurs, particules liquides ou solides désignés ci-après par "rejets atmosphériques", tout rejet de ces matières par des sources fixes et notamment par les installations industrielles.

Art. 3. — Les valeurs limites des rejets atmosphériques sont celles fixées en annexe du présent décret.

Toutefois, en attendant la mise à niveau des installations industrielles anciennes dans un délai de cinq (5) ans, les limites des rejets atmosphériques prennent en charge l'ancienneté des installations industrielles en déterminant une tolérance pour les rejets atmosphériques émanant de ces installations. Ces valeurs sont fixées en annexe du présent décret.

Pour les installations pétrolières, le délai est de sept (7) ans conformément aux dispositions législatives en vigueur et notamment celles de la loi n° 05-07 du 19 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 28 avril 2005, susvisée.

En outre et en raison des particularités propres aux technologies utilisées, des tolérances particulières aux valeurs limites sont également accordées selon les catégories industrielles concernées. Ces tolérances sont annexées au présent décret.

### SECTION 2

#### DES PRESCRIPTIONS TECHNIQUES RELATIVES AUX REJETS ATMOSPHERIQUES

Art. 4. — Les installations générant des rejets atmosphériques doivent être conçues, construites et exploitées de manière à éviter, prévenir ou réduire, à la source, leurs rejets atmosphériques qui ne doivent pas dépasser les limites d'émissions fixées en annexe du présent décret.

Art. 5. — Les rejets atmosphériques doivent être identifiés et captés aussi près que possible de leur source d'émission.

Art. 6. — Les points de rejets atmosphériques doivent être en nombre aussi réduit que possible.

Art. 7. — Les installations de traitement doivent être conçues, exploitées et entretenues de manière à réduire à leur minimum les durées d'indisponibilité pendant lesquelles elles ne peuvent assurer pleinement leur fonction.

Si une indisponibilité est susceptible de conduire à un dépassement des valeurs limites des rejets atmosphériques fixés en annexe, l'exploitant doit prendre les dispositions nécessaires pour réduire la pollution émise en réduisant ou arrêtant si besoin les activités concernées.

Art. 8. — Les rejets atmosphériques traités sont évacués par l'intermédiaire de cheminées ou par une conduite d'évacuation conçue de façon à permettre une bonne diffusion des émissions.

Art. 9. — Lorsque les installations de traitement des rejets atmosphériques sont en panne, l'exploitant peut utiliser une conduite d'évacuation et doit, dans ce cas, informer immédiatement les autorités compétentes.

Art. 10. — Quiconque exploite ou projette de réaliser une installation générant des rejets atmosphériques ne relevant pas de la réglementation des installations classées doit fournir à l'autorité compétente toutes les informations portant sur :

- la nature et la quantité des émissions ;
- le lieu de rejet, la hauteur à partir du sol à laquelle il apparaît et ses variations dans le temps ;
- toute autre caractéristique du rejet, nécessaire pour évaluer les émissions ;
- les mesures de réduction des émissions.

### SECTION 3

#### DU CONTROLE DES REJETS ATMOSPHERIQUES

Art. 11. — Au titre de l'autocontrôle et de l'autosurveillance, les exploitants d'installations générant des rejets atmosphériques doivent tenir un registre où sont consignés la date et les résultats des analyses qu'ils effectuent selon des modalités fixées par arrêté du ministre chargé de l'environnement et, le cas échéant, par arrêté conjoint avec le ministre chargé du secteur concerné.

Les mesures sont effectuées sous la responsabilité de l'exploitant et à ses frais dans les conditions fixées par la réglementation en vigueur.

Art. 12. — Les résultats des analyses doivent être mis à la disposition des services de contrôle habilités.

Art. 13. — Les services habilités en la matière effectuent des contrôles périodiques et ou inopinés des rejets atmosphériques visant à s'assurer de leur conformité aux valeurs limites fixées en annexe du présent décret.

Art. 14. — Le contrôle des rejets atmosphériques comporte un examen des lieux, des mesures et analyses opérées sur place et des prélèvements d'échantillons aux fins d'analyses.

Art. 15. — L'exploitant de l'installation concernée est tenu d'expliquer, commenter ou fonder tout dépassement éventuellement constaté et fournir les actions correctives mises en œuvre ou envisagées.

Art. 16. — Les opérations de contrôle, telles que définies ci-dessus, donnent lieu à la rédaction d'un procès-verbal établi à cet effet.

Le procès-verbal comporte :

- les noms, prénoms et qualité des personnes ayant effectué le contrôle,
- la désignation du ou des générateurs du rejet atmosphérique et de la nature de leur activité,
- la date, l'heure, l'emplacement et les circonstances de l'examen des lieux et des mesures faites sur place,
- les constatations relatives à l'aspect, la couleur, l'odeur du rejet atmosphérique, l'état apparent de la faune et de la flore à proximité du lieu de rejet et les résultats des mesures et des analyses opérées sur place,
- l'identification de chaque échantillon prélevé, accompagné de l'indication de l'emplacement, de l'heure et des circonstances de prélèvement,
- le nom du ou des laboratoires destinataires de l'échantillon prélevé.

Art. 17. — Les méthodes d'échantillonnage, de conservation et de manipulation des échantillons ainsi que les modalités d'analyses sont effectuées selon les normes algériennes en vigueur.

Art. 18. — Toutes dispositions contraires au présent décret et notamment les dispositions du décret exécutif n° 93-165 du 10 juillet 1993, susvisé, sont abrogées.

Art. 19. — Le présent décret sera publié au *Journal officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger, le 16 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 15 avril 2006.

Ahmed OUYAHIA.

## ANNEXE I

## VALEURS LIMITES DES PARAMETRES DE REJETS ATMOSPHERIQUES

N°	PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE DES VALEURS LIMITES DES INDUSTRIES ANCIENNES
1	Poussières totales	mg/Nm <sup>3</sup>	50	100
2	Oxydes de soufre (exprimés en dioxyde de soufre)	"	300	500
3	Oxydes d'azote (exprimés en dioxyde d'azote)	"	300	500
4	Protoxyde d'azote	"	300	500
5	Chlorure d'hydrogène et autres composés inorganiques gazeux du chlore (exprimé en HCL).	"	50	100
6	Fluor et composés inorganiques du fluor (gaz, vésicule et particules), (exprimés en HF)	"	10	20
7	Composés organiques volatils (Rejet total de composés organiques volatils à l'exclusion du méthane)	"	150	200
8	Métaux et composés de métaux (gazeux et particulaires)	"	5	10
9	Rejets de cadmium, mercure et thallium, et de leurs composés	"	0,25	0,5
10	Rejets d'arsenic, sélénium et tellure et de leurs composés autres que ceux visés parmi les rejets de substances cancérigènes	"	1	2
11	Rejets d'antimoine, chrome, cobalt, cuivre, étain, manganèse, nickel, vanadium et zinc, et de leurs composés autres que ceux visés parmi les rejets de substances cancérigènes	"	5	10
12	Phosphine, phosgène	"	1	2
13	Acide cyanhydrique exprimé en HCN, brome et composés inorganiques gazeux du chrome exprimés en HBr, chlore exprimé en HCl, Hydrogène sulfuré	"	5	10
14	Ammoniac	"	50	100
15	Amiante	"	0,1	0,5
16	Autres fibres que l'amiante	"	1	50

## ANNEXE II

**TOLERANCE A CERTAINES VALEURS LIMITES DES PARAMETRES DE REJETS ATMOSPHERIQUES  
SELON LES CATEGORIES D'INSTALLATIONS****1. Raffinage et transformation des produits dérivés du pétrole :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE DES VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS
Oxyde de soufre	mg/Nm <sup>3</sup>	800	1000
Oxyde d'azote	"	200	300
Oxyde de carbone	"	150	200
Composés organiques volatils	"	150	200
Acides sulfureux	"	5	10
Particules	"	30	50

**2. Cimenterie, plâtre et chaux :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE POUR LES INSTALLATIONS ANCIENNES
Poussières	mg/Nm <sup>3</sup>	30	50
Oxyde de soufre	"	500	750
Oxyde d'azote	"	1500	1800
Oxyde de carbone	"	150	200
Acide fluorhydrique	"	5	5
Métaux lourds	"	5	10
Fluor	"	5	10
Chlorure	"	30	50

**3. Fabrication d'engrais azotés :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE POUR LES INSTALLATIONS ANCIENNES
Poussières	mg/Nm <sup>3</sup>	50	100
Oxyde de soufre	"	500	1000
Oxyde d'azote	"	500	800
Acides sulfureux	"	5	10
Acide cyanhydrique	"	5	10
Acide fluorhydrique	"	5	10
Ammoniac	"	50	50
Acide chlorhydrique	"	50	50

**4. Sidérurgie :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE POUR LES INSTALLATIONS ANCIENNES
Poussières	mg/Nm <sup>3</sup>	100	150
Oxyde de soufre	"	1200	1000
Oxyde d'azote	"	850	1200
Oxyde de carbone	"	100	150
Acides sulfureux	"	5	10
Acide cyanhydrique	"	5	10
Acide fluorhydrique	"	5	10
Ammoniac	"	50	50
Acide chlorhydrique	"	50	50
Métaux lourds (Hg, Pb, Cd, As,)	"	5	10

**5. Centrale d'enrobage au bitume de matériaux routiers et installations de séchage de matériaux divers, végétaux organiques ou minéraux :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE POUR LES INSTALLATIONS ANCIENNES
Poussières	mg/Nm <sup>3</sup>	100	150
Composé organique total	mg/Nm <sup>3</sup>	30	50

**6. Installations de manipulation, chargement et déchargement de produits pondéreux :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE POUR LES INSTALLATIONS ANCIENNES
Poussières	mg/Nm <sup>3</sup>	100	150

**7. Production de verre :**

PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE POUR LES INSTALLATIONS ANCIENNES
Poussières	mg/Nm <sup>3</sup>	50	100
Oxyde de soufre	"	1000	1200
Oxyde d'azote	"	500	700
Oxyde de carbone	"	100	150
Acide fluorhydrique	"	5	10
Acide chlorhydrique	"	50	100
Métaux lourds (Hg, Pb, Cd, As,)	"	5	10