

*REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE*

*MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE*

*UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU  
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE*



*Université Mouloud Mammeri  
Tizi-ouzou*

*Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de master  
académique en Génie Mécanique*

*Option : Energétique*

## *Thème :*

*Etude thermique d'une chaudière à vapeur  
4Tonnes/Heure de l'ECFERAL.*

*Proposé par :*

*Mr : FEKKAR*

*Dirigé par :*

*Mr : R.NEBBALI.*

*Réalisé par :*

*Abderrahmane CHABI.*

*Lila MEKZINE.*

*Promotion : 2013-2014*

# REMERCIEMENTS

*Avant tout nous remercions le Bon Dieu de nous avoir donné la santé et le courage d'achever ce modeste travail.*

*Nous exprimons nos profondes gratitude et remerciements à notre promoteur et brillant enseignant M<sup>r</sup> R. NEBBALI. Nous avons eu le privilège de travailler avec vous et d'apprécier vos qualités et vos valeurs. Votre patience qui dérive certainement d'un sens du devoir reconnaissable et vos compétences nous ont toujours marqué. Nous vous remercions pour vos déplacements.*

*Nos sincères reconnaissances à nos chers enseignants, compagnons du chemin énergétique, M<sup>r</sup> MOHELLEBI, M<sup>r</sup> ABDEDOU, M<sup>r</sup> HAMZAOUI, M<sup>r</sup> MAKHLOUF, M<sup>r</sup> FERROUK, M<sup>r</sup> HAMDAD, M<sup>r</sup> TIACHACHT, M<sup>r</sup> ZOUAOUI, M<sup>r</sup> HADID et M<sup>r</sup> BEHTANI. Merci pour votre disponibilité, vos précieux conseils, aide, sympathie et votre humilité. Sans doute vous étiez nos meilleurs enseignants.*

*Merci à l'ECTFERAL d'avoir accepté d'effectuer notre stage à son niveau et à tous le personnel de l'entreprise de nous avoir toujours réservé le meilleur accueil. Remercions M<sup>r</sup> FEKKAR en particulier pour sa présence. Vos encouragements infatigables, votre amabilité méritent toute admiration. A M<sup>r</sup> BOUSETHA, M<sup>r</sup> BENAKMOUM, M<sup>r</sup> KERCHICHE... toute l'équipe technique ; veuillez trouver ici l'expression de notre respectueuse considération.*

*Nos remerciements vont aussi au Président et membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre modeste travail.*

*Merci à tous ceux qui nous ont tendu la main durant toute la réalisation de ce mémoire.*

*Souhaitons que le fruit de nos efforts fournis, jour et nuit,  
nous mènera vers le bonheur fleurit*

*Hommage à notre camarade Kamelia. A*

*Rebbi yarhem'ha*

## DEDICACES

*Je dédie cet humble travail à mes Grands-parents et à mes très chers Parents ; vos prières m'ont toujours été de secours pour mener à bien mes études et d'être toujours là pour moi.  
\*je vous aime\**

*A ma sœur et mes très chers frères qui n'ont jamais cessé de me soutenir et de croire en moi durant 23ans. Tout cela n'aurait jamais été possible sans vous. Vous avez fait pour moi plus que des frères auraient pu faire pour leur petite sœur.*

*Mille mercis...*

*Que Dieu tout puissant vous garde pour moi et vous donne santé et bonheur*

*Aux bleus de la famille : Gendre et Belles sœurs à qui je souhaite la bienvenue dans la famille MEKZINE.*

*A Zahia et Ouerida sans doute les tantes les plus cool qui ont toujours été là pour moi.*

*A mes cousins et cousines que j'aime et qui se reconnaîtront ♥*

*Merci à Mahdjoubati ♥, Akçel, Xayi, Zaza, Yasmine, Emilia, Civa et Aris kfo (Vive Nous ☺) pour leur amitié, pour leur bonne humeur et tous les moments partagés : toutes ces choses qui ont rendu ces années de fac plus légères à qui je souhaite Réussite.*

*Un grand merci également à la L32, Fadhma, Amina, Slim, Yacine, Roza, Youyou, Chanez, Kader, Mehdi, Nouria, Ramdhan, Lounes, M'haand, Idir, Ziva, Sarah, Rafik, Said... pour tous les bons et mauvais moments passés ensemble. J'espère que tout ce que nous avons vécu durant nos thèses ne s'arrêtera pas de si tôt.*

*A Fayza et Farida co-équipières de mémoire au mois de ramadhan à BASTOS =)*

*Un clin d'œil à toute la section de la promotion ENERGETIQUE 2014. Je sais que vous aviez souffert avec toutes les contraintes que nous avons eu mais je sais aussi que les portes de gloire s'ouvriront bientôt pour nous alors... tenez bon « ala l xir ad yilin mayevgha Rebbi ».*

*A mon binôme M<sup>r</sup> CHABI merci de m'avoir proposé de partager ce thème avec toi, ça a été un plaisir, camarade. Les épreuves que nous avons enduré durant la réalisation de ce mémoire sont pour nous que leçon et forgeage @MisTfamilt.*

*MEKZINE Lila*

*Je dédie ce modeste travail à:*

*A la mémoire de ma grand-mère maternelle.*

*Mes très chers parents qui sans eux, je ne serais pas arrivé là où j'en suis. Merci beaucoup.*

*A ma sœur KAHINA et son époux HAMID.*

*A mon frère SAID, sa femme et à tous mes frères (MOKRANE, HACENE et RAMDANE).*

*Ma Grand-mère paternelle.*

*Pour mes petites nièces THLELLI, IWEN, NASSIMO et neveux YOUNES.*

*Que Dieu tout puissant vous donne santé et bonheur infinis.*

*A ma binôme LILA.*

*A mes amis HAMID SABER, HAMID HAMMOUDI, KARIMA KACI, FODIL, TAKLI, RAFIK, SAID, YACINE, AKSEL, MAHDJOUBA, FARFEDJ, BOUKHALFA, NADJIB.*

*Tous les gens qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail et toute personne qui m'a aidé durant mes études.*

*CHABI Abderrahmane*

## ***Lettres latines***

$\alpha_l$ : Diffusivité thermique du liquide	[m <sup>2</sup> /s]
$c$ : constante dépendant de la géométrie du système et de la nature du liquide (pour l'eau : $130 \leq c \leq 200$ ).	
$C_{pf}$ : Chaleur spécifique des fumées qui est évaluée à la température $T_1$ .	[KJ/Kg.K]
$D_{e3}$ : diamètre extérieur des tubes	[m]
$D_{re}$ : Dosage réel	
$D_{st}$ : Dosage stœchiométrique	
$\Delta T_{sat}$ : Ecart de température de saturation	[K]
$g$ : Accélération de la gravitation	[m/s <sup>2</sup> ]
$h$ : Coefficient d'échange de chaleur	[W/m <sup>2</sup> .K]
$h_{e1}$ Coefficient d'échange convectif entre le foyer et l'eau	[W/m <sup>2</sup> .K]
$h_{r1}$ Coefficient d'échange radiatif dans le foyer	[W/m <sup>2</sup> .K]
$h_{r2}$ Coefficient d'échange radiatif dans les tubes	[W/m <sup>2</sup> .K]
$H_G$ : Enthalpie	[J/m <sup>3</sup> ]
$K$ : Coefficient d'échange global	[W/m <sup>2</sup> .K]
$l$ : Dimension caractéristique de la paroi chauffante	[m]
$L_v$ : Chaleur latente de vaporisation.	[J/Kg]
$m_b$ : Débit de combustible	[Nm <sup>3</sup> /s]
$\dot{m}_f$ : Débit des fumées	[kg/s]
$N$ : Nombre de sites par mètre carré.	
$P$ : Pression de l'eau à l'intérieur de la chaudière	[bar]
$P_R$ : Pression réduite de l'eau.	[bar]

$P_{sat}$ : Pression de critique de l'eau	[bar]
$q_T$ : Quantité de chaleur dégagée par les tubes	[J]
$r_{cav}$ : Rayon de la cavité	[m]
$S_{eT}$ : Section extérieur des tubes	[m <sup>2</sup> ]
$S_{e1}$ : Surface extérieure du foyer	[m <sup>2</sup> ]
$S_{e2}$ : Surface extérieure des soixante tubes de fumées	[m <sup>2</sup> ]
$S_{i1}$ : Surface d'échange intérieure du foyer	[m <sup>2</sup> ]
$S_{i2}$ : Surface d'échange intérieure des tubes	[m <sup>2</sup> ]
$T_1$ : Température dans la boîte de retour des fumées.	[K]
$T_2$ : Température des fumées à la sortie de la première range des tubes.	[K]
$T_3$ : Température des fumées à la sortie de la deuxième range des tubes.	[K]
$T_{m1}$ : Température moyennes des fumées dans le foyer	[K]
$T_{m2}$ : Température moyenne des fumées dans première range des tubes	[K]
$T_{m3}$ : Température moyenne des fumées dans la troisième range des tubes	[K]
$T_p$ : Température de la paroi	[K]
$T_{pe1}$ : température moyenne de la paroi extérieure du foyer.	[K]
$T_{pe2}$ : température moyenne de la paroi extérieure des tubes	[K]
$T_{pi1}$ : température moyenne de la paroi intérieure du foyer.	[K]
$T_{pi2}$ : Température moyenne de la paroi intérieure de la première range des tubes.	[K]
$T_{sat}$ : Température de saturation	[K]
$V_a$ : Volume d'air théorique	[m <sup>3</sup> ]
$V_{fo}$ : Pouvoir fumigène sec	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]

$V_{foi}$ : Pouvoir fumigène humide	$[m^3/m^3]$
$V_G$ : Volume des gaz	$[m^3]$
$V_{N_2}$ : Volume d'azote	$[m^3]$
$V_{O_2}$ : Volume d'oxygène	$[m^3]$
PCI : Pouvoir calorifique inférieur.	$[J/Kg]$
PCS : Pouvoir calorifique supérieur.	$[J/Kg]$

## ***Symboles chimiques***

$C$  : Carbone

$CO$  : Monoxyde de carbone

$CO_2$  : Dioxyde de carbone

$CH_4$  : Méthane

$C_2H_6$  : Ethane

$C_3H_8$  : Propane

$C_6H_{14}$  : Hexane+

$H_2$  : Hydrogène

$H_2O$  : Vapeur d'eau

ISO –  $C_4H_{10}$  : I-Butane

N –  $C_4H_{10}$  : N-Butane

N –  $C_5H_{12}$  : N-Pentane

$N_2$  : Azote

$O_2$  : Oxygène

$SO_2$  : Anhydride sulfurique

## ***Lettres grecs***

$\alpha$  : Coefficient d'excès d'air

$\beta_l$  : Coefficient de dilatation volumique du liquide

$\varepsilon$  : Émissivité des gaz de combustion

$\varepsilon_P$  : Rugosité de la paroi [ $\mu\text{m}$ ]

$\vartheta_l$  : Viscosité cinématique du liquide [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$\lambda_l$  : Conductivité thermique du liquide [ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ]

$\rho$  : Masse volumique du gaz naturel [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]

$\rho_v$  : Masse volumique de la vapeur [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]

$\varphi$  : Densité de flux [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$\phi$  : Coefficient de richesse

$\phi$  : Flux de chaleur [ $\text{W}$ ]

$\phi_1$  : flux radiatif échangé du foyer vers la paroi intérieure du foyer. [ $\text{W}$ ]

$\ddot{O}_2$  : Flux conductif échangé entre les parois du foyer. [ $\text{W}$ ]

$\ddot{O}_3$  : Flux convectif échangé entre la paroi extérieure et l'eau. [ $\text{W}$ ]

## ***Nombres adimensionnels***

$$Nu_{D,l} = \frac{h \cdot D}{\lambda_l} = \frac{\varphi \cdot D}{\Delta T_{sat} \cdot \lambda_l} : \text{Nusselt}$$

$$Ra_D = \frac{g \cdot \beta_l \Delta T_{sat} \cdot D^3}{\nu_l \cdot \alpha_l} : \text{Rayleigh}$$

$$Pr_l = \frac{\nu_l}{\alpha_l} : \text{Prandtl}$$

# TABLE DES FIGURES

## Chapitre I

Figure I.1: Schéma d'une chaudière .....	5
Figure I.2: Chaudière à circulation naturelle .....	10
Figure I.3: Chaudière à circulation assistée.....	10
Figure I.4: Chaudière à circulation forcée avec ballon de démarrage.....	11
Figure I.5: Chaudière à tubes de fumées.....	16
Figure I.6: Chaudière à tubes d'eau .....	17
Figure I.7: Chaudière de récupération .....	20

## Chapitre II

Figure II.1: Schéma des constituants principaux de la chaudière MYRA 4000.....	23
Figure II.2: Pressostats .....	25
Figure II.3 : Schéma de la chaudière à vapeur MYRA4000 à tubes de fumées.....	29
Figure II.4 : Atelier de fabrication.....	30
Figure II.5 : Foyer ondulé.....	31
Figure II.6 : tube de foyer lisse de la MYRA4000.....	32
Figure II.7 : boîte de retour.....	32
Figure II.8 : Virole avec plaques tubulaires et piquages.....	33
Figure II.9 : Brûleur ELCO N7 4500.....	33
Figure II.10 : Boîte de retour, foyer et portes montés.....	34
Figure II.11 : Revêtement de la chaudière.....	35
Figure II.12 : Installation de la chaudière MYRA4000 chez le client.....	36
Figure II.13 : Bâche alimentaire.....	37

<i>Figure II.14 : Hernie formée sur une ancienne chaudière allemande du client.....</i>	<i>37</i>
---	-----------

### **Chapitre III**

<i>Figure III.1: Diagramme (H, T) : Variation de l'enthalpie des gaz brulés en fonction de la température .....</i>	<i>53</i>
<i>Figure III.2. Facteur total d'émission du gaz carbonique.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure III.3. Facteur total d'émission de la vapeur d'eau.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure III.4. Facteur correctif <math>C_c</math> pour convertir le facteur total d'émission du <math>CO_2</math> sous une atmosphère de pression totale en facteur total d'émission sous une pression <math>P_T</math> atmosphère.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure III.5. Facteur correctif <math>C_e</math> pour convertir le facteur total d'émission de l'eau en valeur de <math>P_e</math> et <math>P_T</math> autres que 0 et 1atm, respectivement.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure III.6. Correction du facteur total d'émission du gaz due au chevauchement des spectres de la vapeur d'eau et du gaz carbonique.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure III.7: Bilan des forces de tension superficielle pour une goutte déposée sur un support solide .....</i>	<i>61</i>
<i>Figure III.8: Nukiyama's boiling curve (heat transfer hand book) .....</i>	<i>62</i>
<i>Figure III.9: Régimes d'ébullition en vase .....</i>	<i>63</i>
<i>Figure III.10: Schéma définissant la disposition des flux et des températures dans la chaudière.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure III.11 : Organigramme suivi lors du calcul du bilan thermique de la chaudière.....</i>	<i>70</i>
<i>Figure III.12 : Schématisation de la distribution de chaleur dans un tube du deuxième parcours.....</i>	<i>76</i>
<i>Figure III.13 : Schématisation de la distribution de chaleur dans un tube du troisième parcours.....</i>	<i>78</i>

# **LISTE DES TABLEAUX**

## **Chapitre II :**

*Tableau II.1 : Caractéristiques techniques de la chaudière MYRA4000.....28*

## **Chapitre III :**

*Tableau III.1 : composition chimique du gaz naturel de HASSI-R'MEL .....43*

*Tableau III.2 : Tableau récapitulatif du calcul du bilan matériel de la combustion.....49*

*Tableau III.3 : Valeurs des enthalpies des produits de combustion en fonction de l'excès d'air.....52*

*Tableau III.4 : Tableau récapitulatif de la température théorique de combustion  $T_c$  pour différentes valeurs de l'excès d'air.....54*

*Tableau III.5 : Tableau de quelques corrélations valables dans les zones d'ébullition pour une surface chauffante tubulaire de rayon  $R$ .....67*

# SOMMAIRE

---

*Nomenclature*

*Table des figures*

*Liste des tableaux*

**INTRODUCTION GENERALE** .....1

**PRESENTATION DE L'ECFERAL**.....3

**CHAPITRE I : Généralités sur les chaudières**

*I.1. Définition*.....5

*I.2. Différents organes d'une chaudière et accessoires :*.....6

*I.2.1. Eléments principaux :* .....6

*I.2.1.1. Le foyer ou chambre de combustion:* .....6

*I.2.1.2. Le brûleur :* .....6

*I.2.1.3. Faisceau vaporisation :* .....7

*I.2.1.4. Ventilateur :* .....7

*I.2.1.5. Cheminée :* .....7

*I.2.1.6. Armatures (Robinetterie) :* .....7

*I.2.1.7. Isolation :* .....7

*I.2.1.8. Le Ballon :* .....8

*I.2.1.9. Armoire électrique :* .....8

*I.2.2. Les appareils de récupération :* .....8

*I.2.2.1. Réchauffeur d'eau ou économiseur :* .....8

*I.2.2.2. Surchauffeur de vapeur :*.....8

*I.2.2.3. Réchauffeur d'air :* .....9

*I.2.2.4. Resurchauffeur :* .....9

*I.3. Principe de fonctionnement d'une chaudière* .....9

*I.4. Classification des chaudières :* .....10

# SOMMAIRE

---

<i>I.4.1. Type de circulation de l'eau :</i>	<i>10</i>
<i>I.4.2. Utilisation :</i>	<i>13</i>
<i>I.4.3. Nature du combustible :</i>	<i>13</i>
<i>I.4.4. La pression de circuit des gaz de combustion :</i>	<i>14</i>
<i>I.4.5. Mode de conception :</i>	<i>14</i>
<i>I.4.6. Les caractéristiques thermodynamiques et puissances :</i>	<i>15</i>
<i>I.4.7. Type du fluide caloporteur :</i>	<i>15</i>
<i>I.5 Types de chaudières :</i>	<i>16</i>
<i>I.5.1. Chaudières à tubes de fumées :</i>	<i>16</i>
<i>I.5.2. Chaudières à tubes d'eau :</i>	<i>18</i>
<i>I.5.3. Chaudières à eau chaude :</i>	<i>19</i>
<i>I.5.4. Chaudières à combustion sous pression :</i>	<i>19</i>
<i>I.5.5. Chaudières à fluide caloporteur :</i>	<i>20</i>
<i>I.5.6. Chaudières de récupération :</i>	<i>20</i>
 <b>CHAPITRE II : Présentation de la chaudière MYRA 4000</b>	
<i>II.1. Description et fonctionnement de la chaudière MYRA 4000</i>	<i>22</i>
<i>II.1.1. Constituants principaux</i>	<i>23</i>
<i>I.1.1.1. Corps chaudronné</i>	<i>23</i>
<i>II.1.1.2. Brûleur</i>	<i>24</i>
<i>II.1.1.3. Circuit d'eau</i>	<i>24</i>
<i>II.1.1.4. Circuit vapeur</i>	<i>24</i>
<i>II.1.1.5. Système d'air et de fumées</i>	<i>25</i>
<i>II.1.1.6. Régulations et sécurités</i>	<i>25</i>
<i>II.1.1.6.1. Pressostats</i>	<i>25</i>

# SOMMAIRE

---

II.1.1.6.2. Bloc de sondes de niveau d'eau à électrodes.....	26
II.1.1.6.3. Soupapes de sécurité.....	26
II.1.1.6.4. Voyant flamme .....	27
II.1.1.6.5. Sirène.....	27
II.1.1.7. Piétements (piquages) .....	27
II.1.1.8. Tableau de commande et contrôle.....	27
II.1.2. Caractéristiques techniques de la chaudière MYRA 4000:.....	28
II.2. Partie stage pratique.....	30
Conclusion .....	38
 <b>CHAPITRE III : Notions sur le transfert de chaleur et étude thermique</b>	
III.1. Combustion .....	39
III.1.1. Définitions .....	39
III.1.1.1. Le pouvoir calorifique .....	39
III.1.1.2. Coefficient d'excès d'air .....	40
III.1.1.3. Le pouvoir fumigène.....	41
III.1.2. Définition de la combustion.....	41
III.1.2.1. Type de combustible .....	42
III.1.2.2. Le comburant .....	42
III.1.2.3. Conditions nécessaires pour une combustion parfaite .....	42
III.1.2.4. Les différents types ou aspects de combustion .....	42
III.1.2.4.a. Combustion neutre ou stœchiométrique .....	42

# SOMMAIRE

---

III.1.2.4.b. Combustion complète avec excès d'air .....	43
III.1.2.4.c. Combustion réductrice ou en manque d'air .....	43
III.1.2.5. Choix du combustible.....	43
III.1.2.6. Masse volumique du gaz naturel.....	44
III.1.2.7. Pouvoir calorifique inférieur (PCI).....	44
III.1.2.8. Température d'inflammation .....	44
III.1.3. Equations de la combustion .....	45
III.1.4. Quantité d'air nécessaire $V_a^0$ .....	46
III.1.4.1. Combustion du méthane $CH_4$ .....	46
III.1.4.2. Combustion d'éthane $C_2H_6$ .....	46
III.1.4.3. Combustion du propane $C_3H_8$ .....	46
III.1.4.4. Combustion du butane $C_4H_{10}$ .....	47
III.1.4.5. Combustion du pentane $C_5H_{12}$ .....	47
III.1.4.6. Combustion d'hexane $C_6H_{14}$ .....	47
III.1.5. Composition des résultats de combustion .....	47
III.1.5.1. Volume du dioxyde de Carbone $V_{CO_2}^0$ .....	48
III.1.5.2. Volume de la vapeur d'eau $H_2O$ produite $V_{H_2O}^0$ .....	48
III.1.5.3. Volume d'azote $V_{N_2}^0$ .....	48
III.1.5.4. Volume d'hélium $V_{He}^0$ .....	49
III.1.6. Enthalpies des produits de combustion $H_g$ .....	50
III.1.7. Température théorique de combustion $T_c$ .....	54

# SOMMAIRE

---

III.1.8. <i>Température théorique de combustion <math>T_c</math> pour différentes valeurs d'excès d'air</i> .....	55
III.2. <i>Notions générales sur le transfert de chaleur</i> .....	55
III.2.1. <i>La conduction</i> .....	56
III.2.2. <i>La Convection</i> .....	56
III.2.3 <i>Le rayonnement</i> .....	57
III.2.3.1. <i>Pour de faible concentration</i> .....	57
III.2.3.2. <i>Pour de grande concentration</i> .....	57
III.3. <i>Généralités sur la formation de la vapeur d'eau</i> .....	61
III.3.1. <i>Théorie élémentaire de la formation des bulles</i> .....	62
III.3.2. <i>L'ébullition en eau stagnante ou en « vase » (Pool Boiling)</i> .....	62
III.3.2.1. <i>Les régimes d'ébullition, la courbe de Nukiyama</i> .....	63
III.3.3. <i>Convection naturelle en phase liquide dans un cylindre horizontal</i> .....	69
III.4. <i>Bilan thermique de la chaudière/calcul des températures des gaz de fumées</i> .....	70
III.4.1. <i>Calcul de la température <math>T_1</math> dans la boîte de retour en régime permanent</i> .....	72
III.4.2 <i>calcul de la température <math>T_2</math> du deuxième parcours</i> .....	75
III.4.3 <i>bilan au niveau du troisième parcours</i> .....	78
<i>Conclusion</i> .....	80
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	81
<i>Références bibliographiques</i>	
<i>Annexes</i>	

# INTRODUCTION GENERALE

---

L'intensification des domaines en besoin d'énergie justifie d'une part l'évolution rapide des technologies au cours de ces dernières années. Ce besoin est en croissance incessant et la chaudière est l'une parmi ces éléments constitutifs de production d'énergie ; on en distingue : les chaudières domestiques, productrices d'énergie et industrielles.

L'idée d'utiliser la vapeur comme force motrice remonte au 1er siècle après Jésus-Christ avec l'invention de l'éolipile par Héron d'Alexandrie. Mais ce n'est véritablement qu'à partir de la fin du 17ème siècle que les ingénieurs ont développé les machines à vapeur modernes.

Au 19<sup>ème</sup> siècle, la chaudière comportait deux parties distinctes, le foyer et le bouilleur; le premier est entièrement garni de réfractaire qui assure la combustion, et le second utilise cette chaleur pour créer de la vapeur.

Dans le but d'augmenter la surface de chauffe pour un même encombrement, on a utilisé d'abord des tubes de fumées à l'intérieur du bouilleur puis la chaudière à tubes d'eau.

Le but de toute chaudière est de transférer une quantité de chaleur à l'eau afin de : la chauffer, l'évaporer et ou la surchauffer tout dépend de l'usage (domestique ou industriel). L'une des énergies les plus demandées et utilisées est « la vapeur » qui est un fluide extrêmement moderne avec des performances qui conviennent aux demandes strictes d'innombrables industries à travers le monde. Ses domaines d'utilisation sont entre autres l'industrie du papier et des matériaux de construction, les raffineries, l'industrie pharmaceutique et la transformation d'aliments à l'échelle industrielle. La vapeur entraîne les turbines pour produire du courant, vulcanise les produits de caoutchouc et stérilise les emballages.

Les objectifs de notre travail est de faire un bilan thermique à la chaudière étudiée, la chaudière à vapeur MYRA4000 fabriquée par l'entreprise Algérienne ECFERAL située à el-Harrach d'Alger.

Comme dans notre étude thermique de la chaudière à vapeur MYRA4000 on dispose de trois chapitres dont le premier qui expose des généralités sur les chaudières, présentation de la chaudière MYRA4000 pour le second chapitre et enfin dans le troisième chapitre on se focalisera sur la combustion et le bilan thermique.

## INTRODUCTION GENERALE

---

Le dernier chapitre rappelle les notions du transfert de chaleur, explique bien le phénomène de l'ébullition en vase clos avec citation de quelques corrélations correspondantes à ses différents régimes, pour se consacrer enfin aux calculs des flux échangés traversant les trois parcours, de la chaudière à vapeur en question de timbre  $P=12$  bar et de débit de vapeur de 4 Tonnes/heure type tubes de fumées, afin d'arriver aux températures de combustion et des fumées.

Les calculs sont basés sur l'utilisation des propriétés thermodynamiques de l'eau, de sa vapeur et des gaz de combustion en raisonnant suivant les équations chimiques de combustion et les divers modes du transfert de chaleur. Le livre de Holmann et les Techniques de l'Ingénieur et bien d'autres nous ont été de fortes sources bibliographiques.

## Présentation de l'entreprise

---

**ECFERAL** : l'Entreprise de Chaudronnerie et de Ferblanterie d'Alger.

Créée le 1<sup>ier</sup> Janvier 1985 (la date d'entrée en exploitation) au capital social de 245.865.000.00 DA. Son siège social, ainsi que les bâtiments de production et le parc de l'entreprise sont installés sur site de 7523 m<sup>2</sup>. Dans la zone d'activités d'El Harrach. Elle exploite un showroom (immeuble construit en R+1 sur une assiette de 312 m<sup>2</sup>). ECFERAL est aujourd'hui le seul producteur de chaudière industrielle en Algérie. Elle a installé à ce jour plus de 3000 chaudières sur le territoire national.

### ***Historique :***

Après l'indépendance, elle regroupait 04 ateliers : GRISA, CERRUTI, ABDELHAK et SEMMONS qui ont été fusionnés en 1972 pour créer la coopérative métallurgique.

En 1985 : la coopérative métallurgique a pris en charge l'unité économique de la wilaya avec l'ensemble de son personnel, ce qui a donné naissance à ECFERAL sous tutelle de la wilaya.

Le 28 octobre 1997 : ECFERAL est devenue une entreprise publique économique avec un capital social de 10 000.000 DA.

Le 12 août 2002 : expertise des stations d'incinération sous contrôle du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.

Le 13 juillet 2005 : certificat de classification catégorie VII(7) obtenu par la commission interministérielle (Ministère l'Habitat et Ministère des Travaux Publics).

Le 06 février 2006 : certificat de l'IANOR (marque TEDJ pour la 1<sup>ière</sup> chaudière à vapeur Myra 1500)

En 2007 l'entreprise s'est engagée dans une démarche d'amélioration de la qualité dans le cadre de la certification management qualité selon le référentiel ISO 9001-2002

L'entreprise est inscrite dans le cadre du système de management environnementale, un contrat de performance avec le ministère de l'environnement a été signé dans ce cadre.

## Présentation de l'entreprise

---

### *Activités :*

- Fabrication de chaudière industrielle (à vapeur).
- Travaux de maintenance et d'installation des chaudières et réseaux vapeur.
- Fabrication de générateurs à eau chaude.
- Fabrication d'incinérateurs.
- Chaudronnerie générale.
- Equipements de traitement des fumées.

***Introduction :***

La chaudière fait office d'échangeur de chaleur pour transférer la chaleur libérée, après combustion, au fluide (eau) qui circule dans le circuit de chauffe généralement pour produire de la vapeur. La vapeur d'eau est une énergie dont il existe de nombreux usages domestiques, notamment : alimentaire, repassage, nettoyage et tapissage. La vapeur est également utilisée dans la catapulte d'un porte avion.

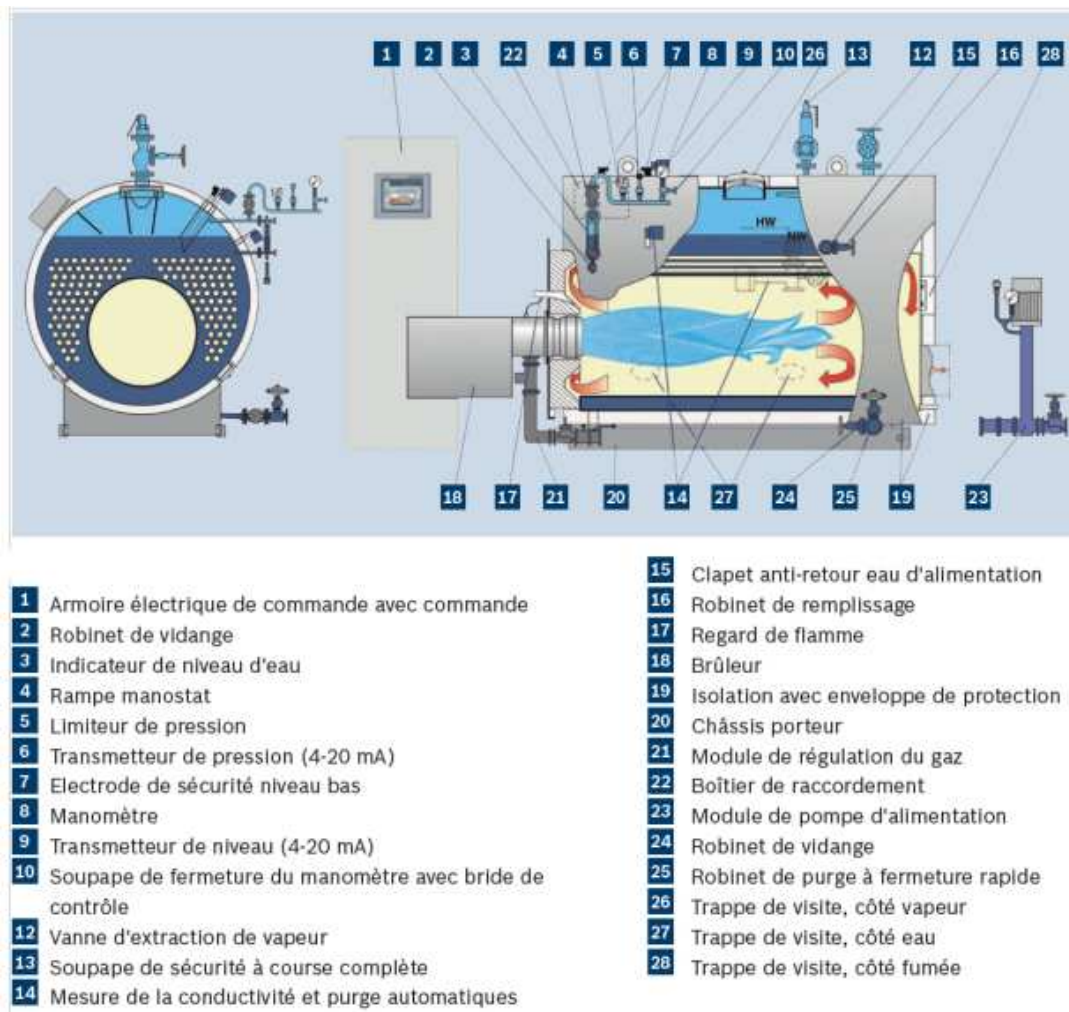
***1.1. Définition :***

La Chaudière est un grand vaisseau en métal où l'on fait chauffer (un liquide transporteur de chaleur ou de production de vapeur énergétique) bouillir ou cuire. Autrement dit c'est un appareil dont le rôle est de transmettre à un fluide thermique, les calories dégagées par une combustion. Cette combustion peut se faire dans la chaudière (foyer) ou bien à l'extérieur (c'est le cas des chaudières de récupération). Cet apport de chaleur a pour effet soit uniquement de réchauffer le fluide thermique, soit de le réchauffer et le vaporiser.

Parfois elle est dénommée groupe évaporateur, terme qui prend en compte toutes les composantes d'une chaudière.

## I.2. Différents organes d'une chaudière et accessoires :

### I.2.1. Les éléments principaux :



**Figure I.1 : Schéma d'une chaudière. [1]**

#### I.2.1.1. Le foyer ou chambre de combustion:

C'est la partie principale du générateur de vapeur son rôle est d'assurer l'échange thermique de la chaudière en dégageant une quantité de chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau.

#### I.2.1.2. Le brûleur :

Appareil qui met en présence un combustible et un comburant, afin d'introduire le gaz dans la chambre de combustion, d'adapter la flamme à l'usage à laquelle elle est destinée (longueur, volume, température, dureté) et de permettre de régler la combustion à sa sortie.

Mais le rôle fondamental du brûleur est de changer l'état physique du combustible de telle façon qu'il passe de l'état liquide à l'état de vapeur ou à l'état de très fines gouttelettes afin qu'il puisse s'enflammer.

Il existe deux types de brûleurs selon le combustible utilisé: à fuel ou à gaz.

### ***1.2.1.3. Faisceau vaporisation :***

C'est un ensemble de tubes entourant la chambre de combustible où l'émulsion eau vapeur y circule. Cette dernière est recueillie dans un réservoir où a lieu la séparation entre la vapeur et l'eau cette vapeur sera ensuite surchauffée.

Pour éviter les pertes importantes qui résultaient à leur envoi à la cheminée, d'autres genres de surface de chauffe sont encore prévues, constituant les réchauffeurs d'eau ou économiseurs et les réchauffeurs d'air.

### ***1.2.1.4. Ventilateur :***

Il assure la circulation des gaz dans le générateur de vapeur y compris les fumées, et l'air de combustion.

### ***1.2.1.5. Cheminée :***

La chaudière est équipée d'une cheminée métallique c'est par là que les fumées sont évacuées après avoir été refroidies.

### ***1.2.1.6. Armatures (Robinetterie) :***

Les chaudières comprennent les divers registres, soupapes de Sécurité, voyant de flamme, robinets qui servent à l'ouverture et la fermeture des conduits et divers instruments de mesure de vapeur. L'utilisation de ses équipements améliore la sécurité et le bon fonctionnement de l'ensemble.

### ***1.2.1.7. Isolation :***

Les parois extérieures des chaudières sont recouvertes d'un isolant soit de la laine de verre ou de la réfractaire.

***1.2.1.8. Le Ballon :***

C'est un réservoir où se trouvent les deux phases liquide-vapeur, son rôle est de séparer l'eau de sa vapeur et d'assurer la circulation naturelle de la vapeur.

***1.2.1.9. Armoire électrique :***

L'armoire électrique est un boîtier qui contient un réseau de distributions électriques, fonctionnant avec des résistances chauffantes et éventuellement, à différentes fréquences. Son rôle essentiel est de protéger ce réseau de tout incident dangereux et elle nous assure le fonctionnement automatique de la chaudière.

***1.2.2. Les appareils de récupération :******1.2.2.1. Réchauffeur d'eau ou économiseur :***

Les économiseurs sont des faisceaux de tubes horizontaux, généralement dans les chaudières à haute pression, leurs rôles est de récupérer une partie des calories contenue dans les gaz de combustion en vue d'augmenter la température de l'eau d'alimentation avant que celle-ci regagne le ballon chaudière. Il est situé en fin de parcours des gaz de combustion.

L'économiseur présente l'avantage d'augmentation du rendement de la chaudière par la diminution des pertes de chaleur.

***1.2.2.2. Le surchauffeur de vapeur***

Les surchauffeurs sont constitués d'une série de serpentins tubulaires généralement identiques, ils servent à chauffer la vapeur saturée venant du ballon, et la rendre vive afin d'améliorer le rendement du cycle thermodynamique.

- ***Avantage de la surchauffe :***

Condensation de la vapeur saturée (condensation due à un abaissement de température par suite à un contact avec une paroi froide) entraîne une perte de chaleur et une accumulation d'eau dans les tubes et les collecteurs. Ce qui provoque une chute considérable de la vitesse d'écoulement de la vapeur, tandis qu'une vapeur surchauffée peut subir un abaissement de température, sans qu'il y ait condensation d'où l'avantage de la surchauffe.

- ***Conditions que doit remplir le surchauffeur:***
  - Un rendement thermique élevé.
  - L'espace occupé par le surchauffeur doit être optimal.
  - La vapeur et la fumée doivent traverser rapidement l'appareil ; ce qui implique une faible perte de charge.
  - Le grand volume de vapeur, qui circule dans le surchauffeur, nécessite des tubes de grandes sections et une surface d'échange importante.
  - Réduire les contraintes thermiques par le choix des matériaux résistants à la chaleur.

### ***1.2.2.3. Réchauffeur d'air :***

Le réchauffeur d'air constitue le dernier échangeur récupérant de la chaleur contenue dans les gaz de fumée. Cette chaleur est utilisée pour réchauffer l'air destiné à la combustion.

La plus part de ces échangeurs sont constitués par des tubes inoxydables, à l'intérieur, circule l'air tandis que la fumée circule à l'extérieur.

### ***1.2.2.4. Resurchauffeur :***

Son rôle est identique à celui de surchauffeur il est situé derrière le surchauffeur.

## ***1.3. Principe de fonctionnement d'une chaudière :***

Le principe de fonctionnement se résume par le transfert de chaleur du fluide chaud au fluide froid.

Le fluide chaud est caractérisé par les gaz de fumées dus à la combustion et le fluide froid dans ces différentes phases (liquide, liquide-vapeur, vapeur).

Les gaz chauds prennent naissance grâce à la combustion du combustible et de l'air comburant apporté du milieu extérieur, ces gaz doivent céder leur chaleur en se refroidissant graduellement le long de leur trajet au contact de la surface qui les sépare du fluide froid.

La circulation de ces fluides est nécessaire pour obtenir une production continue de la vapeur.

***I.4. Classification des chaudières :***

On classe généralement les diverses installations selon :

- Le type de circulation d'eau.
- L'utilisation.
- La nature du combustible.
- La pression du circuit des gaz de combustion.
- Le mode de construction.
- Les caractéristiques thermodynamiques.
- Type du fluide caloporteur.

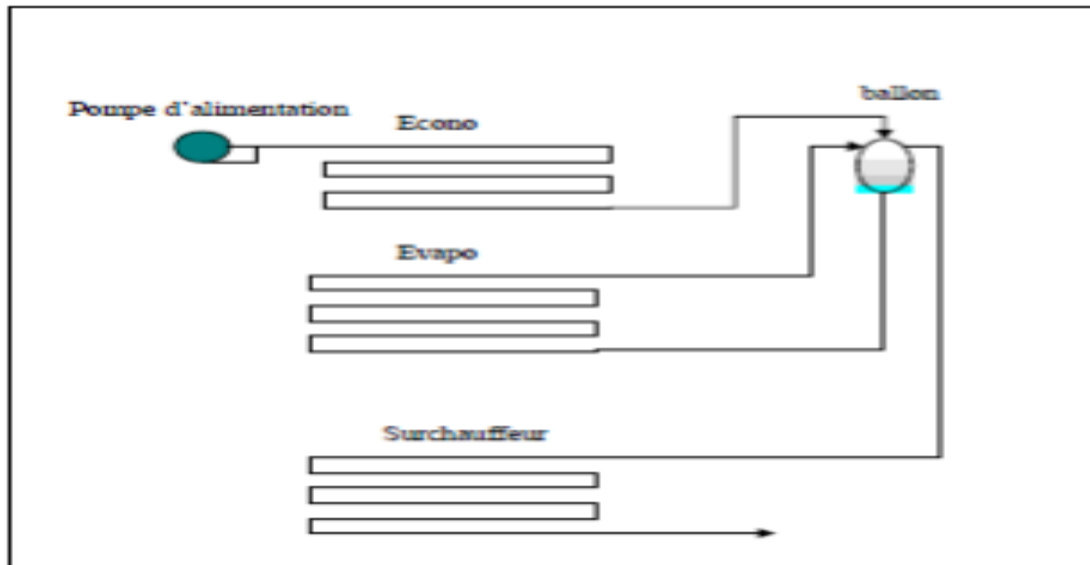
En somme, la classification est basée selon le domaine d'utilisation, le débit et les caractéristiques de la vapeur ou de l'eau produite. [2]

***I.4.1. Type de circulation de l'eau :***

Pour ce genre de chaudière on distingue deux types

- ***Circulation naturelle :***

La circulation naturelle résulte de la différence de densité entre l'eau dans les tubes vaporisateurs sortants du ballon et le mélange eau-vapeur dans les tuyaux de retour vers le ballon. La circulation naturelle est d'autant meilleure que la différence de hauteur entre le ballon et les tubes vaporisateurs est grande. Ce genre de circulation présente un bon rendement.

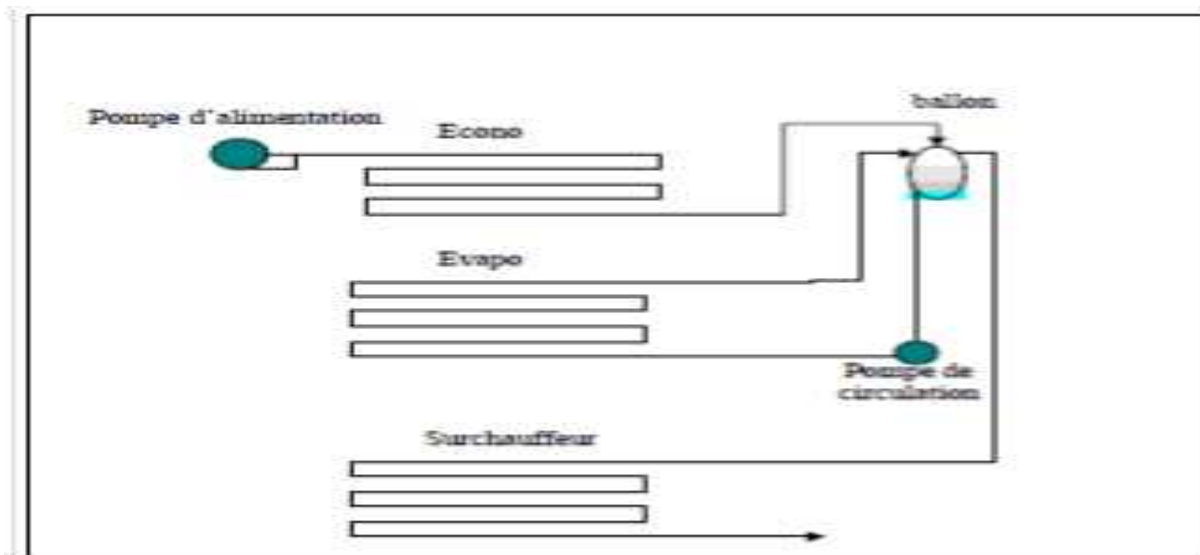


*Figure I.2 : chaudière à Circulation naturelle.[3]*

- *Circulation assistée :*

Lorsque la pression de la vapeur augmente, le tirage naturel dans les tubes de l'évaporateur devient insuffisant. Une pompe de circulation est alors introduite dans la boucle de vaporisation pour vaincre les pertes de charge du mélange eau-vapeur à déplacer.

C'est un schéma couramment rencontré pour des pressions comprises entre 100 et 180 bars.



*Figure I-3: chaudière à circulation assistée. [3]*

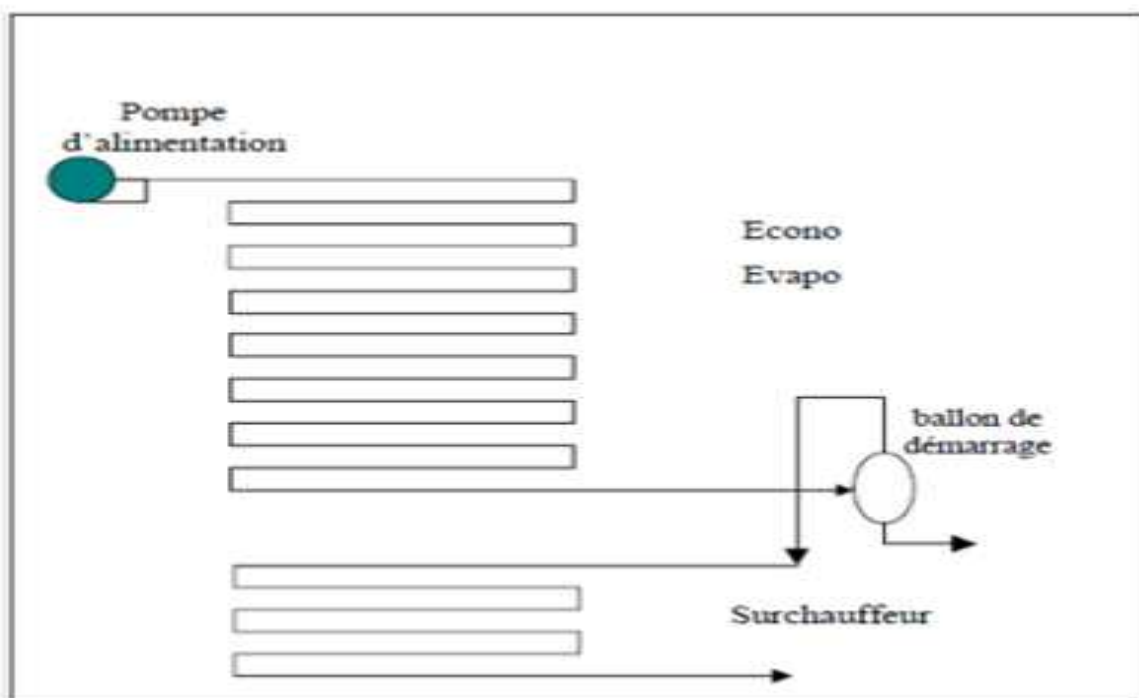
Pour des pressions supérieures, on rencontrera des chaudières à circulation forcée.

- *Circulation forcée :*

Les chaudières les plus modernes peuvent être à vaporisation totale (once-through boiler): elles ne comportent théoriquement plus de réservoir matérialisant la séparation eau vapeur et sont constituées d'un grand nombre de tubes parallèles à l'intérieur desquels l'eau se réchauffe, se vaporise, et se surchauffe en un seul passage.

Une chaudière à circulation forcée diffère d'une chaudière classique, à circulation naturelle ou assistée, de par le nombre d'éléments qui la composent. En effet, une chaudière classique comprend un économiseur, un vaporiseur avec ballon de séparation et un surchauffeur. Dans une chaudière à circulation forcée, on ne peut plus faire la différence entre l'économiseur et le vaporiseur, et s'il subsiste un ballon de séparation, non seulement sa taille est fortement réduite, mais en plus, son utilité est principalement limitée à la phase de démarrage de la chaudière, pendant laquelle l'eau soutirée à la base du ballon est renvoyée vers le dégazeur, le surchauffeur n'étant opérationnel que lorsque le débit de vapeur sortant du ballon est suffisant.

Par contre elle présente l'inconvénient de consommation d'énergie par la pompe.



**Figure I.4 : chaudière à circulation forcée avec ballon de démarrage. [3]**

### ***1.4.2. Utilisation :***

On distingue les chaudières productrices d'énergie, les chaudières industrielles, les chaudières de chauffage et les chaudières mixtes.

➤ ***Chaudières productrices d'énergie :***

Les chaudières productrices d'énergie servent principalement à produire de la vapeur d'eau ayant des caractéristiques très élevées. Cette vapeur est ensuite utilisée pour produire de l'énergie mécanique, ensuite il sera transformé en énergie électrique à l'aide d'un alternateur. Ces installations sont appelées des centrales thermoélectriques ou thermiques.

➤ ***Chaudières industrielles:***

Ce type de chaudières produit de la vapeur modérée (pression < à 20 bars), et faiblement surchauffée (entre 50°C et 100°C) de la température de saturation. Cette vapeur sert à satisfaire les besoins des entreprises, tels que le chauffage d'eau, l'évaporation et le séchage des divers produits et matières.

➤ ***Chaudières pour le chauffage :***

Comme leur nom l'indique, ces chaudières produisent de la vapeur saturée à basse pression ou de l'eau chaude qui est par la suite employée pour le chauffage des bâtiments d'habitation ou industrielle.

➤ ***Chaudières mixtes :***

Ces chaudières sont utilisées pour plusieurs usages, pour les besoins industriels et pour le chauffage.

### ***1.4.3. Nature du combustible :***

Un combustible est un mélange complexe composé d'éléments chimiques suivants :

Carbone, hydrogène, oxygène et azote.

On distingue trois types de combustibles pour les chaudières : solide, liquide et gazeux.

Il n'est pas commode d'envisager de brûler un combustible solide tel que le charbon. Celui-ci pose, en effet, un problème difficile d'introduction, d'évacuation de cendres et de dépoussiérage, éventuellement à haute température.

Parmi les combustibles liquides, le fuel pose également un problème spécifique; certaines de ses impuretés, en particulier les oxydes de Vanadium  $V_2O_5$ , engendrent des corrosions à haute température des surfaces d'échange, en raison des flux thermiques élevés qui y règnent.

Seul le gaz naturel propre est facilement envisageable, ce qui limite pour l'instant l'intérêt de la conception des chaudières sous pression.

La nature du combustible détermine le type du foyer et du brûleur convenable.

#### ***1.4.4. La pression de circuit des gaz de combustion :***

La combustion sous pression, qui est surtout applicable aux combustibles liquides ou gazeux. Elle permet, par le raccourcissement des flammes et l'augmentation des échanges thermiques entre fumées et parois, de développer une puissance thermique considérable dans un petit volume, parfois plus de 7 MW/m<sup>3</sup> de chambre alors que, sous la pression atmosphérique, on dépasse rarement 1,8 à 2 MW/m<sup>3</sup>.

On distingue les chambres de combustion suivantes :

- Chambre de combustion en dépression : Les installations traditionnelles comportent un ou plusieurs ventilateurs de tirage où la chambre de combustion est maintenue en dépression.
- Chambre de combustion pressurisée : Ce type de générateur ne comporte que des ventilateurs de soufflage et la chambre de combustion est ainsi sous pression.

#### ***1.4.5. Mode de conception :***

La classification se fait selon le trajet des fumées par rapport aux tubes, lorsque la circulation des gaz s'effectue à l'intérieur des tubes, on dit qu'il s'agit des chaudières à tubes de fumées, par contre si elle se fait à l'extérieur c'est le cas des chaudières à tubes d'eau.

Faut mentionner le cas rare des chaudières ambitubulaires qui combinent les tubes d'eau et les tubes de fumées.

***I.4.6. Les caractéristiques thermodynamiques et puissances :***

- Classification des installations en fonction de la vapeur d'eau produite :
  - installation à basse pression de 8 à 13 bar.
  - Installation à moyenne pression de 18 à 39 bar.
  - Installation à haute pression de 60 à 140 bar.
  - Installation à très hautes pressions de 150 à 220 bar.
  - Installation à pression hypercritiques au-delà de 230 bar
  
- Classification des installations d'après le débit de vapeur produite :
  - petite installation de 4 à 6 T/h.
  - moyenne installation de 8 à 75 T/h.
  - installation de grandes puissances de 100 à 420T/h.
  - installation de très grandes puissances a partir de 600T/h.

***I.4.7. Type du fluide caloporteur :***

Propriétés d'un bon fluide caloporteur : Un bon fluide caloporteur doit répondre à un certain nombre de conditions d'ordre technique ou économique :

- Etre d'un approvisionnement facile.
- Ne nécessiter que des matériaux classiques pour les chaudières qu'il parcourt.
- Ne pas se décomposer sous l'effet de la chaleur à la température de fonctionnement.
- Avoir une très faible viscosité aux températures de fonctionnement.
- Avoir une capacité thermique massique (ou chaleur spécifique) et une conductivité thermique aussi élevées que possible.
- Avoir une forte enthalpie (ou chaleur latente) de vaporisation dans le cas de l'utilisation en phase vapeur.
- Avoir une faible pression de vapeur saturante (ou tension de vapeur).

Il existe plusieurs types de fluides caloporteurs parmi eux, on a :

- L'eau est, bien sûr, le plus ancien fluide caloporteur ; elle possède toutes les conditions requises ci-dessus, hormis la dernière : sa pression de vapeur croît en effet très vite avec la température. Son utilisation en phase liquide oblige donc à travailler à très forte pression, avec les problèmes techniques et économiques qui s'ensuivent.

- Les huiles minérales utilisées comme fluide caloporteur sont composées essentiellement d'hydrocarbures aromatiques ou naphthéniques ; elles ont une bonne résistance à la température, une faible viscosité dans le domaine des basses températures, de bonnes capacités thermiques massiques et peuvent fonctionner à la pression atmosphérique pour des températures allant jusqu'à environ 300°C.

- L'un des fluides organiques les plus utilisés a été mis au point à l'origine aux États-Unis par Dow Chemical, à savoir un mélange eutectique azéotropique formé de 26,5 % de diphényl ( $C_6H_5$ ) et de 73,5 % d'oxyde de diphényl ( $C_6H_5$ )<sub>2</sub>O; il fond à 12°C et bout à la pression atmosphérique à 258°C.

De nombreux autres fluides caloporteurs organiques peuvent être utilisés jusqu'à plus de 300°C.

### ***1.5. Types de chaudières :***

On distingue plusieurs types de chaudières qui diffèrent l'une de l'autre selon leur classification qu'on a défini auparavant. Dans ce qui suit, nous nous intéresserons aux chaudières industrielles.

Elles couvrent une plage très étendue de capacités et de technologies. Elles ont une très large panoplie de solutions spécifiques pour des industries telles que la sidérurgie, la chimie, la papeterie, les cimenteries et autres ; on a donc : [2]

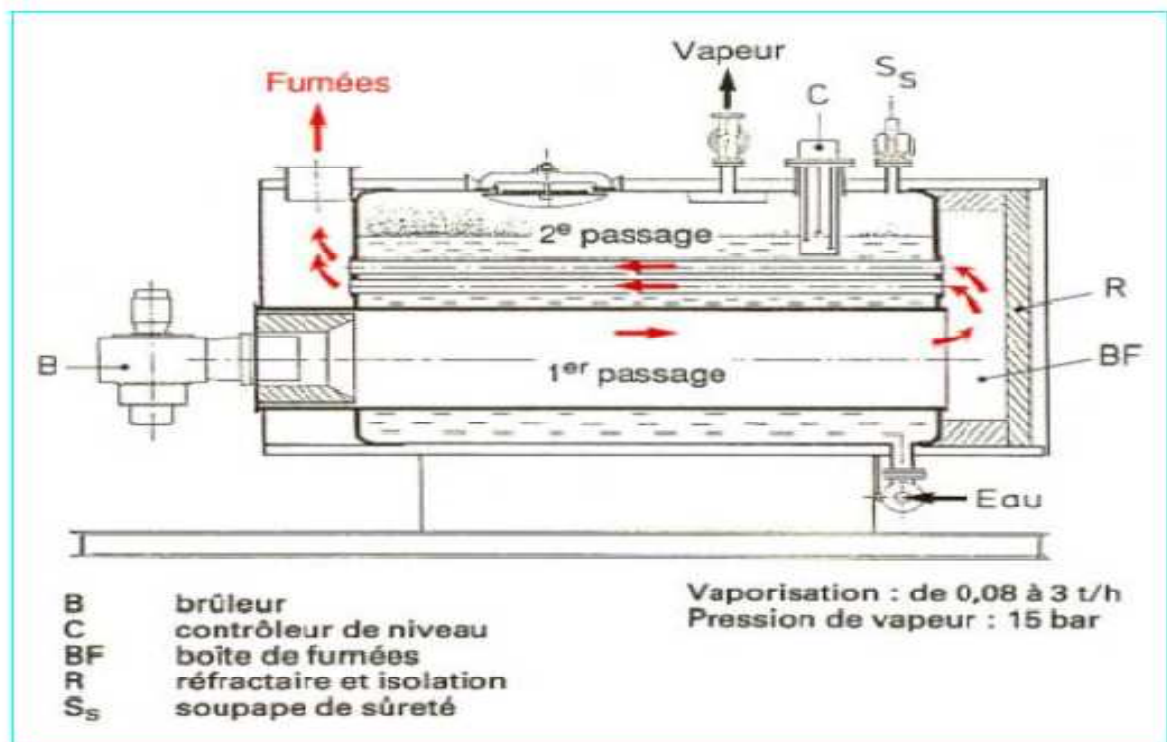
#### ***1.5.1. Chaudières à tubes de fumées :***

Les chaudières à tubes de fumées dérivent actuellement des premières chaudières à bouilleur et des chaudières semi-tubulaires dans lesquelles, en fonction des progrès de la technologie de construction, on a cherché à augmenter la surface d'échange initialement limitée aux parois des corps cylindriques lésés extérieurement par les fumées.

Dans ces chaudières qui sont bien connues depuis plus de 100 ans, les fumées circulent à l'intérieur des tubes et l'eau baigne ces tubes à l'extérieur. L'évolution s'est faite tout d'abord par l'adjonction d'un gros tube de « retour de flamme » immergé dans le corps principal, remplacé ensuite par une multitude de tubes de fumées de petit diamètre offrant dans le même volume une surface de contact supérieure, d'où le nom de chaudière semi-tubulaire. Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur saturée de 5 à 20 tonnes/heure en basse et moyenne pression. Le combustible utilisé est soit du gaz soit du fioul. Pour ce type de chaudière on peut trouver un ou plusieurs passages de fumée.

Il y a trois emplacements de la boîte de fumée qui diffèrent selon les caractéristiques de la chaudière à tubes de fumées :

- Boîte immergée.
- Boîte semi-immersée.
- Boîte extérieure.



*Figure I.5 : Chaudière à tubes de fumées. [2]*

### ***1.5.2. Chaudières à tubes d'eau :***

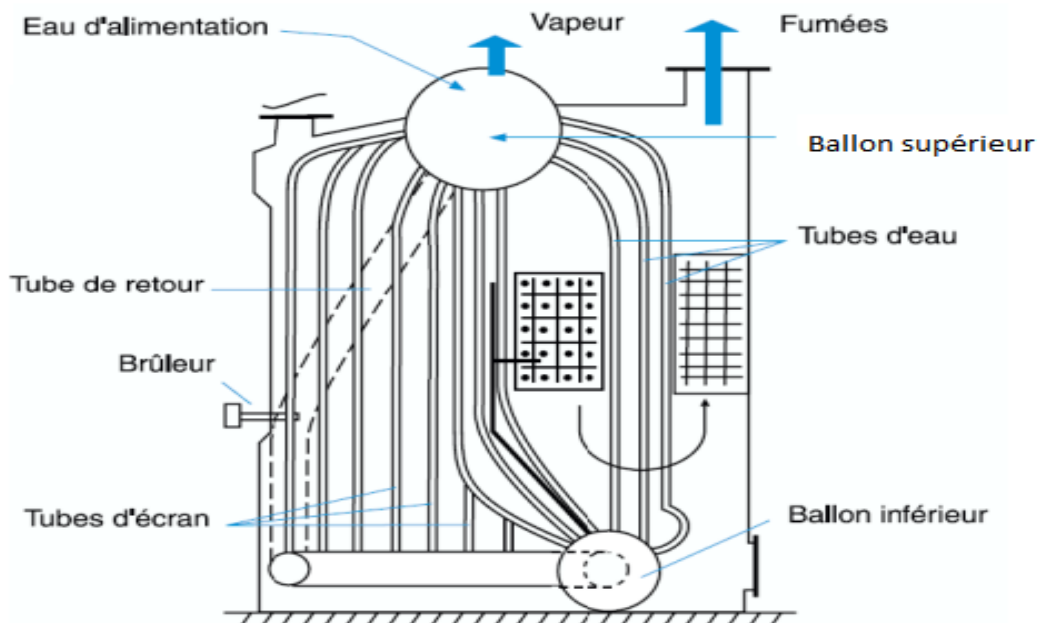
Elles ne subissent pas les contraintes des chaudières à tubes de fumées (dimensions du corps cylindrique, tubes soumis à la pression extérieure, etc.) et permettent de couvrir toute la gamme de vaporisation des chaudières industrielles de 0,1 à 400 t/ h. Elles représentent la grande majorité des chaudières mises en service.

Le combustible utilisé est soit du gaz, du fioul, du charbon ou déchets.

Ce type de chaudière possède deux réservoirs appelés ballon distributeur (en partie inférieure) et ballon collecteur (ou encore ballon de vaporisation, en partie supérieure), reliés par un faisceau de tubes vaporisateurs, dans cet ensemble circule l'eau qui se transforme en vapeur.

Les gaz chauds produits par le brûleur sont directement en contact avec les tubes vaporisateurs, à l'intérieur de ceux-ci se produit la vaporisation. La vapeur ainsi générée est collectée dans le ballon supérieur, l'eau excédentaire est ramenée vers le ballon inférieur par des tubes de chute non soumis à la chaleur.

Dans le domaine des hautes pressions, une pompe peut être installée pour faciliter cette circulation du haut vers le bas.



**Figure I.6 : Chaudière à tubes d'eau. [1]**

Il y a donc circulation de l'eau dans des tubes placés à l'intérieur d'une enceinte contenant les gaz chauds.

Parmi les chaudières à tubes d'eau, passons en revue :

- Les petites chaudières à vaporisation instantanée.
- Les petites chaudières à tubes borgnes de type Field et dérivées.
- Les chaudières à tubes inclinés, horizontaux ou verticaux.

### ***1.5.3. Chaudières à eau chaude :***

Une chaudière à eau chaude est un appareil qui permet d'utiliser directement la chaleur de combustion d'un combustible quelconque pour réchauffer de l'eau de la température  $T_0$  d'entrée à la température  $T_1$  requise à la sortie pour son utilisation en phase liquide, à la pression  $p$  du réseau définie seulement à la hauteur géométrique et aux pertes de charges près.

L'exemple le plus simple des chaudières à eau chaude est les chaudières de chauffage central débitant sur un réseau à la pression atmosphérique dans ce cas la température  $T_1$  est inférieur à  $100^\circ\text{C}$ . Il existe deux types d'installation de chaudières domestiques :

- Chaudières au sol : Les chaudières au sol sont en général utilisées pour des habitations disposant d'un sous sol ou d'un garage. Elles occupent néanmoins une place importante
- Chaudières murales : Les chaudières murales conviennent aux habitations de petite taille (appartements). Elles offrent une puissance moindre que les chaudières au sol.

### ***1.5.4. Chaudières à combustion sous pression :***

Dans les chaudières à combustion sous pression, la température très élevée des fumées quittant la chambre impose, plus que dans celles à combustion à la pression atmosphérique, d'intercaler, avant le surchauffeur, un faisceau vaporisateur qui ramène la température des fumées à une valeur plus modérée.

Les chaudières à combustion sous pression de plusieurs bar sont destinées à faire partie d'un ensemble à cycle combiné. La combustion sous pression génère une forte quantité d'oxydes d'azote, ce qui va à l'encontre des limitations actuelles concernant les rejets gazeux à l'atmosphère. Elles sont utilisées dans les chambres à combustion des turbines à gaz ou des turbomachines d'aviation.

Comme exemples de réalisations de chaudières sous pression on a les chaudières marines sous pression. [12]

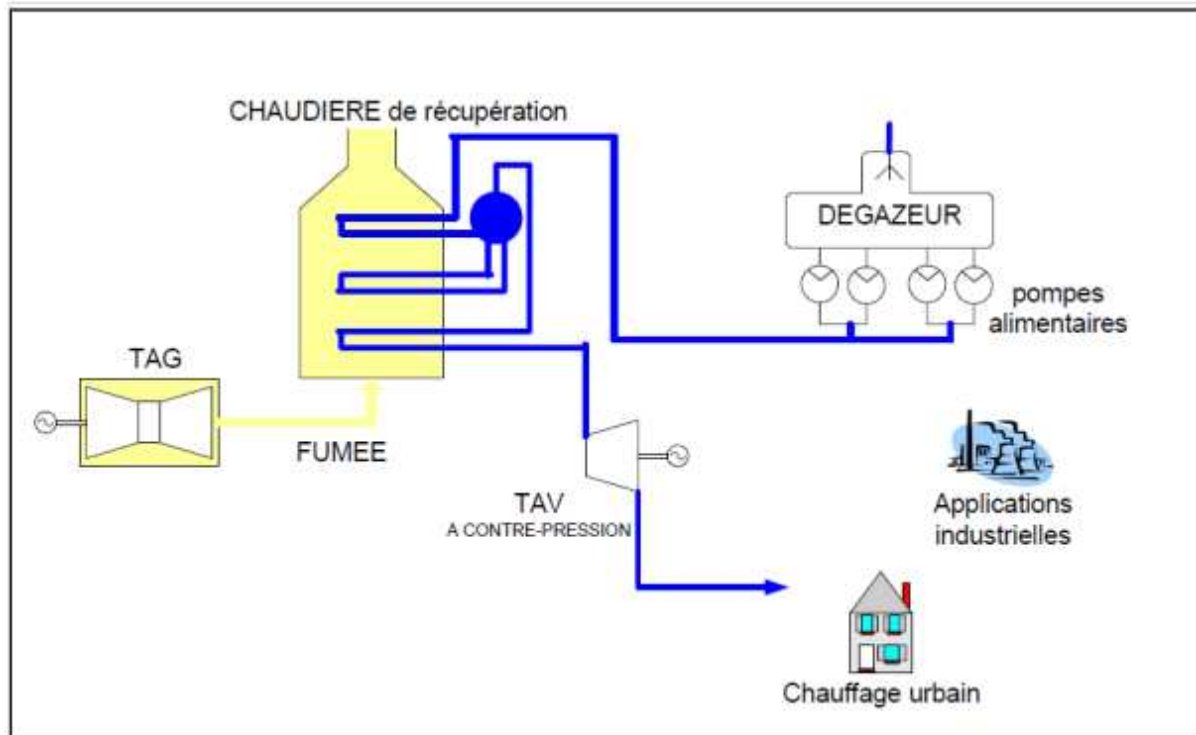
- Vélox.
- Sural.
- Foster-Wheeler.

### ***1.5.5. Chaudières à fluide caloporteur :***

L'apparition des chaudières à fluide caloporteur, encore appelées chaudières à fluide thermique, est liée au développement des industries chimiques et pétrochimiques après la première guerre mondiale. Ces industries exigeaient en effet, pour leur fabrication, des niveaux de température de plus en plus élevés, difficiles à atteindre avec des générateurs thermiques classiques, sauf au prix de pressions de travail très élevées. La propriété marquante des fluides caloporteurs est, en effet, de permettre un réchauffage dans la plage de température 300 à 400°C à des pressions inférieures à 10 bar.

### ***1.5.6. Chaudières de récupération :***

Les chaudières de récupération ont, elles aussi, des caractéristiques très variées, dictées par les processus industriels auxquelles elles sont associées. Elles produisent soit de la vapeur de chauffe, utilisée en d'autres points de l'installation qui nécessitent un apport de chaleur, soit de la vapeur énergétique, dont la détente dans des turbines permet d'entraîner certaines machines, telles que des compresseurs, des pompes ou alors des alternateurs connectés à un transformateur pour la production d'électricité. Ou la production de l'eau chaude pour le chauffage.



*Figure I.7 : Chaudières de récupération. [3]*

**Conclusion :**

Dans ce chapitre on a pu voir les différentes chaudières qui existent ainsi que leur classification et leur utilisation, on vu les chaudières industrielle, domestiques, agro-alimentaire ...

***Introduction :***

La chaudière sur laquelle notre étude se porte est la MYRA 4000 à tubes de fumées ; notons que c'est une chaudière à 3 parcours afin d'avoir un rendement maximal. Comme son nom l'indique son rôle est de fournir un débit de vapeur saturée de 4000Kg/h à une pression de service de 12 bar. Le brûleur utilisé (bicombustible) peut la faire fonctionner au gaz naturel ou au fuel qui est du modèle ELCO N7 4500.

***II.1. Description et fonctionnement de la chaudière MYRA 4000 :***

La chaudière MYRA 4000 est une chaudière à vapeur cylindrique et horizontale, constituée d'un tube de foyer lisse intérieur en tôle(par où circulent la flamme et les gaz de fumées) placé en bas de la chaudière car les fumées se meuvent naturellement du bas vers le haut et une boîte de retour des fumées extérieure à l'arrière de la chaudière qui emmagasine les fumées avant qu'elles ne soient transportées par les tubes de fumées immergés dans l'eau, pour lesquelles nous verrons par la suite la température.

Les tubes de fumées sont divisés en deux groupes ; le premier transporte les fumées de la boîte de retour à l'avant de la chaudière et le second transporte les fumées de l'avant de la chaudière vers la cheminée. De ce fait, on dit qu'il y a transfert de chaleur des gaz de fumées vers l'eau. Par la suite cette dernière subit une vaporisation ainsi on a production de la vapeur qui se dégage de la «vanne de départ vapeur».

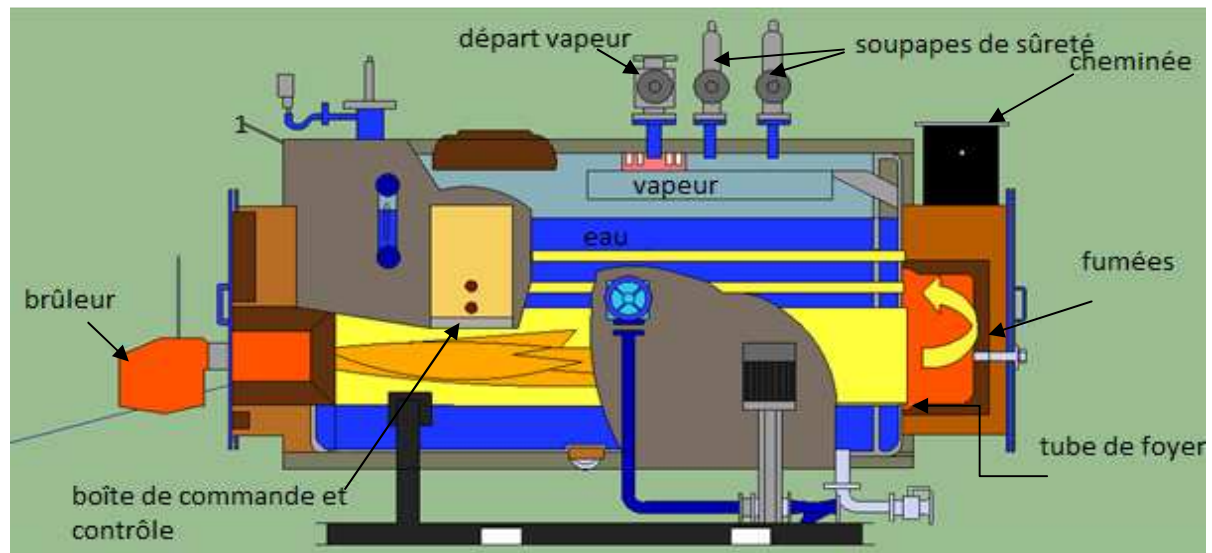
Elle est fermée des deux côtés par des plaques tubulaires, sur lesquelles sont soudés les tubes. Des portes montées sur les deux extrémités de la chaudière permettant l'accès au foyer, aux plaques tubulaires et à la boîte de retour des fumées.

L'enveloppe cylindrique (virole) comporte aussi des ouvertures appelées, trous de visite (trou de poing sur les flancs et trou d'homme sur la génératrice supérieure) pour accéder et visiter les faisceaux tubulaires et le corps intérieur.

La MYRA4000 est protégée de l'extérieur pour prévenir l'anticorrosion par une peinture antirouille, comme isolant thermique et acoustique dans la construction par de la laine de roche (matériau fait des fibres minérales ne propageant pas le feu et n'est pas cancérigène) 80mm d'épaisseur (en bicouches) et enfin avec un revêtement en tôle inoxydable 6/10 mm. En outre, elle a aussi des accessoires de sécurité nécessaires à son bon fonctionnement.

Elle est fabriquée conformément à la réglementation, en application en Algérie, relative aux équipements sous pression de vapeur (Décret n° 90/246 du 18/08/1990). Elle est disposée sur un socle en poutrelle d'acier qui fait des éléments de la chaudière un bloc uni.

La chaudière à tubes de fumées décrite ci-avant avec un schéma fait sous auto-cad permet de produire de la vapeur en fonctionnement automatique.



*Figure II.1 : Schéma des constituants principaux de la chaudière MYRA 4000*

### **II.1.1. Constituants principaux :**

#### **I.1.1.1. Corps chaudronné :**

Le corps de chauffe de la chaudière est composé :

- D'un corps cylindrique en tôle de qualité chaudière, selon la norme de référence.
- D'un foyer lisse en tôle, de la même qualité, soudée sur les plaques tubulaires et destiné à recevoir le brûleur avec sa flamme.
- De deux plaques tubulaires embouties en tôle de nuance, choisies, suivant la norme de référence, soudées avec le corps de la chaudière.
- De tubes de fumée de nuance, choisie, suivant la norme de référence.
- D'ouvertures d'inspection selon la norme de référence.

**II.1.1.2. Brûleur**

Un brûleur est un appareil mécanique qui met en présence un combustible (fuel ou gaz) et de l'air comburant chargé d'oxygène afin de permettre et de régler la combustion à sa sortie. Avoir un rendement maximal nécessite un meilleur réglage du mélange. Il a donc un rôle déterminant dans la qualité de la combustion, et par la suite dans l'émission de polluants ou d'imbrûlés. Il y'a plusieurs sortes de brûleurs selon le type de carburant (solide, liquide ou gazeux), brûleurs à air soufflé, à marche modulante avec possibilité d'avoir un brûleur bicom bustible (gaz et fuel) comme dans le cas de notre chaudière à vapeur qui est équipée d'un brûleur bicom bustible de haute technologie de la marque ELCO type N7 4500.

N : NEXTRON

7 : dimension

4500 : référence de puissance

**II.1.1.3. Circuit d'eau**

L'eau d'appoint de la chaudière y arrive au moyen d'une pompe verticale multicellulaire installée directement sur la tuyauterie. L'eau est aspirée et refoulée vers la chaudière via des conduites avec des caractéristiques convenables.

**II.1.1.4. Circuit vapeur**

De la vapeur saturée est produite sous l'effet de la chaleur transférée du tube foyer et des tubes de fumées à l'eau noyée dans la virole. Elle est dirigée dans les conduites de vapeur avec la pression correspondante au besoin du client utilisateur.

**II.1.1.5. Système d'air et de fumées.**

La chaudière se met en marche après que la première torche de flamme soit déclenchée. Elle est issue, dans notre cas, par la combustion qui a eu lieu dans le brûleur du gaz naturel (combustible) + air (comburant). Ces deux derniers développent la flamme jusqu'à atteindre le maximum de la flamme.

Au 1<sup>er</sup> et 2<sup>nd</sup> parcours, de la chaleur est perdue, ça résulte de son absorption par l'eau, provenant des tubes. Au 3<sup>ème</sup> et dernier parcours, la température des gaz a beaucoup plus baissée que dans les deux premiers et sont rejetés vers l'atmosphère via la cheminée. Pour d'autres fins autres que notre cas, les gaz d'échappement peuvent être utilisés par le surchauffeur pour surchauffer la vapeur saturée produite.

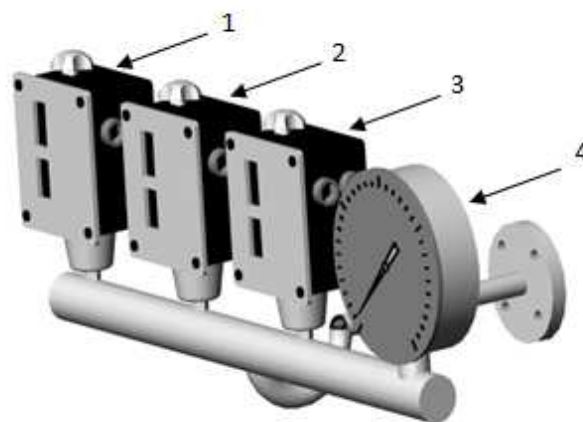
#### **II.1.1.6. Régulations et sécurités.**

- 03 pressostats de régulation de pression 0-17 bar de marque DAFNOSS.
- 01 manomètre à cadran de 100 mm-échelle 0 à 25 bar, de type manomètre à bain de glycérine, raccord vertical.
- 01 robinet à pointeau pour manomètre à bride porte Mano étalon.
- 02 indicateurs de niveau à glace avec vannes d'isolements et une vanne de purge (entre axe : 380mm).
- 01 bloc de régulation et contrôle de niveau d'eau constitué d'une sonde à quatre électrodes (niveau bas ; niveau haut ; niveau très bas).

##### **II.1.1.6.1. Pressostats :**

C'est des limiteurs de pression, ils servent à transmettre le signal à l'armoire électrique afin de couper l'apport calorifique à la chaudière par la coupure du brûleur, ou régler les allures du brûleur pour économiser le maximum d'énergie.

On trouve sur la chaudière MYRA trois pressostats montés en série avec le manomètre sur un même collecteur, à savoir :



**Figure II.2 : Pressostats.**

- (1)- Pressostat de sécurité: sert à couper le courant électrique dès que la pression atteindra la pression de service ou le timbre (pression maximale autorisée au service).
- (2)- Pressostat de service : sert à couper le courant dès que la pression atteindra la pression voulue par l'utilisateur.
- (3)- Pressostat d'allure du brûleur : sert à régler les allures du brûleur.
- (4)- Manomètre : placé en vue du chauffeur et gradué de manière à indiquer en bars la pression de vapeur. Une marque très apparente est indiquée, sur l'échelle du manomètre, la limite que la pression ne doit pas dépasser.

#### ***II.1.1.6.2. Bloc de sondes de niveau d'eau à électrodes :***

Ce sont des capteurs de niveau d'eau à l'intérieur de la chaudière, ils servent à transmettre le signal à l'armoire électrique, afin de procéder à l'opération de régulation de niveau d'eau.

Il est composé de trois sondes à savoir :

- Sonde de niveau d'eau haut : elle sert à transmettre le signal à l'armoire électrique afin de couper le courant électrique de la pompe d'eau d'alimentation.
- La sonde de niveau d'eau bas : elle sert à transmettre le signal à l'armoire électrique afin de mettre la pompe en marche.
- La sonde de niveau d'eau très bas : elle sert à transmettre le signal à l'armoire électrique afin de couper l'apport calorifique par la coupure du courant électrique au brûleur et déclencher l'alarme sonore.

#### ***II.1.1.6.3. Soupapes de sécurité :***

Chaque chaudière MYRA est équipée de deux soupapes de sureté. Elles sont de type à ressort, qui empêchent tout excès de pression selon la norme de référence.

#### **Indicateurs de niveau d'eau à glace :**

Equipée de deux indicateurs de niveau d'eau, de type réfractaire de sécurité.

Ce dispositif facilite la visibilité du niveau d'eau, ils sont indépendants l'un de l'autre, situés sur les flancs de la chaudière, disposés de manière à pouvoir être vérifiés, nettoyés et remplacés facilement et sans risque pour l'opérateur.

On trouve trois repères marqués sur les indicateurs de niveau d'eau :

- Niveau d'eau haut est le niveau à ne pas dépasser et la pompe d'eau doit s'arrêter
- Niveau d'eau bas est le niveau duquel la pompe doit reprendre l'alimentation en eau.
- Niveau d'eau très bas est le niveau au-dessous duquel l'eau ne doit en aucun cas descendre

#### ***II.1.1.6.4. Voyant flamme :***

Un regard flamme fixé au niveau de la porte côté cheminée sur le côté du brûleur afin de pouvoir régler la flamme du brûleur.

#### ***II.1.1.6.5. Sirène:***

Appareil d'alarme sonore incorporé avec l'armoire électrique se déclenchant lorsque le niveau d'eau est au-dessous du niveau d'eau très bas. Elle signale aussi les défauts au niveau du brûleur.

#### ***II.1.1.7. Piétements (piquages)***

- Prise de départ vapeur.
- Alimentation d'eau.
- Vidange et extraction des boues.
- Prise de vapeur d'installation des pressostats de régulation et manomètre.
- Piétement d'installation des électrodes de niveaux d'eau.
- Prises de vapeur et d'eau pour les indicateurs de niveaux d'eau à glaces.
- Piétement d'installation des soupapes de sûreté.

#### ***II.1.1.8. Tableau de commande et contrôle***

Il est fourni avec la chaudière, avec les caractéristiques suivantes :

- Tension électrique : 3x380 +n.
- Alarme sonore niveau bas.
- Alarme sonore défaut brûleur.
- Voyants rouges de signalisation du défaut : brûleur, pompe.
- Voyants verts de signalisation de mise en marche.
- Voyant de mise sous tension.

- Commutateurs de commandes manuelle/automatique pour le brûleur, les pompes et le générateur.
- Bouton poussoir pour l'arrêt d'urgence.

### II.1.2. Caractéristiques techniques de la chaudière MYRA 4000 :

Désignation	MYRA 4000
Type	Chaudière à tube de fumées.
Position	Horizontale.
Fluide	Vapeur d'eau saturée.
Débit de vapeur produite	4000 Kg/h.
Puissance calorifique	2560 000 K cal/h.
	2975 KW.
Surface de chauffe	100 m <sup>2</sup>
Température maximum	175 °C.
Contenance	10020 litres.
Timbre	12 bars.
Pression d'épreuve	18 bars.
Protection extérieur	Anticorrosion : peinture antirouille.
	Calorifuge : laine de roche 80 mm d'épaisseur (en bicouche).
	Revêtement tôle inoxydable 0.6mm.
Encombrement	Longueur : 5.20 m sans brûleur.
	Largeur : 2.60 m.
	Hauteur : 3.30 m
Poids à vide	14 000 Kg.

**Tableau II.1 : Caractéristiques techniques de la chaudière MYRA4000.**

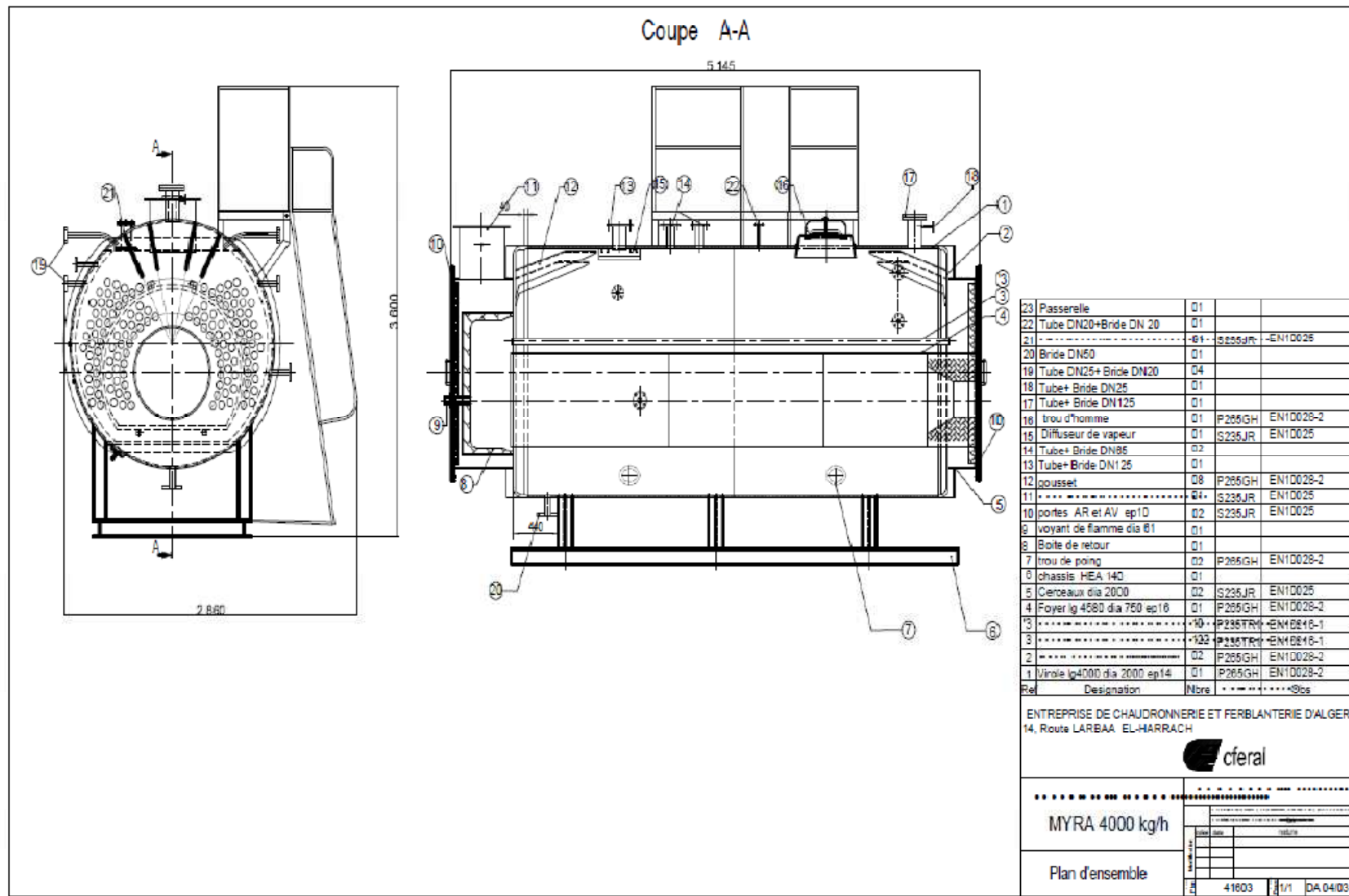


Figure II.3 : schéma de la chaudière à vapeur MYRA4000 à tubes de fumées.

**II.2. Partie stage pratique :**

Durant notre modeste durée de stage pratique, effectué au sein de l'Entreprise de Chaudronnerie et de FERblanterie d'ALger (ECFERAL). Dans ce qui suit, nous allons citer les événements les plus importants remarqués et choses apprises du stage pratique.

Vue le danger et les volumes occupés par ses produits et outillages ; l'ECFERAL dispose d'un grand atelier où se déroule les étapes de fabrication. Elle investit pour offrir les meilleures conditions de travail à ses employés citons en priorité deux ponts élévateurs (7500Kg ,5000Kg) et entrée à l'atelier avec tenue de sécurité exigée par le service H.S.E. (hygiène sécurité et environnement). L'entreprise dans toutes ses démarches tient à ce que ses ingénieurs qualifiés, en personnes, à vérifier et suivre les étapes de réalisation des chaudières depuis l'étude de conception dans leur bureaux, passant par la phase fabrication et arrivant à l'installation et mise à feu chez le client.



**Figure II.4 : Atelier de fabrication.**

L'équipe technique est motivée et encourage la recherche scientifique c'est pour cela qu'on nous a permis de voir, de suivre la réalisation de la MYRA4000 et de voir d'autres modèles en cours de réalisation tels que : la chaudière à capacité de vapeur 1.5T/h, 6T/h,8T/h avec un foyer ondulé ; chose que nous ne connaissons pas avant, la fabrication des gigantesques et petit incinérateur et d'assister à l'incinération de quelques (déchets médicaux) médicaments. On a eu la chance d'avoir eu une induction de toute l'entreprise ECFERAL.



*Figure II.5 : Foyer ondulé.*

Pour la réalisation de la MYRA 4000, notre stage avait commencé de justesse avec la fabrication du foyer lisse de la virole et la boîte de retour séparément.



*Figure II.6 : tube de foyer lisse de la MYRA4000.*



*Figure II.7 : boîte de retour.*

En réalité, les tubes tirants sont utilisés car ils contribuent à la ténacité de la structure métallique.

Les plaques métalliques étaient prêtes avant au millimètre près, découpées avec la machine à découpe plasma ultra moderne puis avec la cintreuse suffisait de joindre les extrémités avec précision, souder pour avoir la forme voulue, entre autre (cylindrique) avec le diamètre voulu.



*Figure II.8 : Virole avec plaques tubulaires et piquages.*

Après notre visite au magasin de l'entreprise, situé à la première grande cour d'entrée, nous avons vu les pièces nécessaires et accessoires qu'ECFERAL exige de placer dans ces chaudières telles que les pressostats, les soupapes de sureté et nous avons vu le brûleur qui sera placé sur la MYRA 4000 sur laquelle notre travail se porte : le brûleur bicom bustible de la marque ELCO.



*Figure II.9 : Brûleur ELCO N7 4500.*

A notre deuxième semaine de stage, la boîte de retour, le foyer et les portes ont été montées.



*Figure II.10 : Boîte de retour, foyer et portes montés*

ECFERAL ne laisse aucun détail, les ingénieurs et les techniciens chargés du contrôle de qualité appartenant à l'entreprise même, l'ingénieur des mines dépendant du ministère des énergies et des mines et les contrôleurs de l'ENACT viennent vérifier l'état de la chaudière, à des étapes précises selon les normes suivies, pour approuver les certifications obtenues par

l'entreprise auprès de différentes organisations (IANOR, ISO9001, ISO14001, ISO18001...) afin aussi de remettre au client un produit bien fini. Ceci a été fait avec des méthodes de Contrôle Non Destructif (C.N.D.) telles l'usage des caméras thermographiques et des radiographies à rayon X auxquelles nous n'avons pas assisté pour raisons de sécurité.

Après que toutes les pièces et accessoires de sûreté soient montées, vient le revêtement de la chaudière avec la laine de roche : un matériau isolant thermique et acoustique en bicouches ensuite recouverte avec une tôle inoxydable finissant par une peinture anticorrosion.



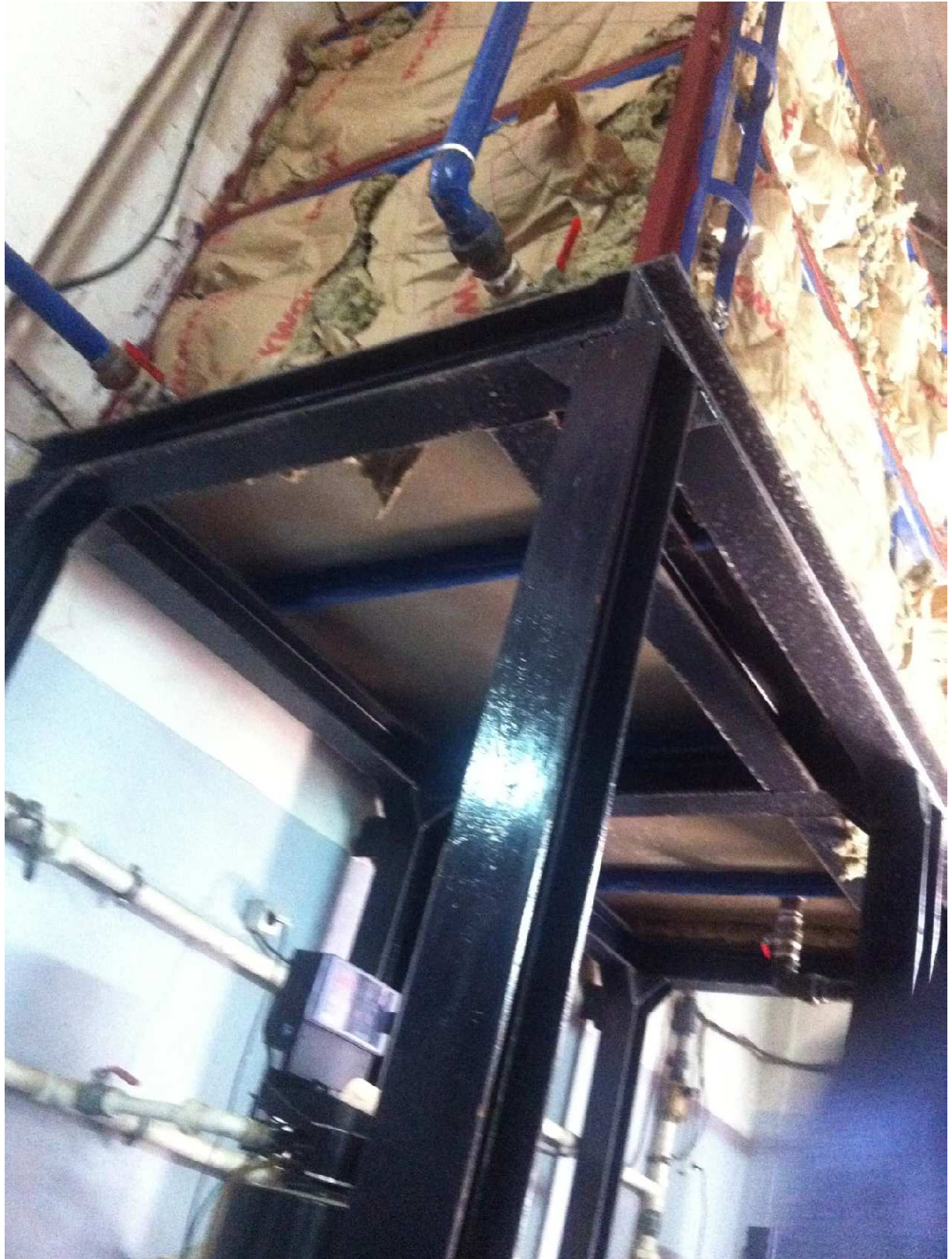
*Figure II.11 : Revêtement de la chaudière.*

ECFERAL assure la première mise en service et l'assistance en toute circonstance. Nous l'approuvons car on a été chez le client (hôtel Le Mercure d'Alger) lors de l'installation de la MYRA4000 mais vue les contraintes de temps et un problème dans la chaufferie du client nous n'étions pas présent lors de la mise à feu.



***Figure II.12 : Installation de la chaudière MYRA4000 chez le client.***

Une bête alimentaire placée en hauteur dans la chaufferie pour alimenter la chaudière en eau ce qui explique la circulation naturelle dans cette dernière.



*Figure II.13 : Bâche alimentaire.*

**Conclusion:**

- L'entretien, l'exploitation et la surveillance de la chaudière doit être assuré par un conducteur de chaufferie qualifié et formé sur les chaudières.
- Le client doit s'assurer que l'eau circulant dans la chaudière est traitée « sans calcaire » ceci pourrait poser un problème dangereux pour la chaufferie, son entourage (mortel) et donc freiner son utilité. Une énorme hernie comme sur l'image ci-dessous ou carrément une explosion.



**Figure II.14 : Hernie formée sur une ancienne chaudière allemande du client.**

- On suggère à l'entreprise d'introduire une cellule énergétique, car on a constaté qu'il n'y a aucun thermicien au sein de l'équipe technique. L'association des énergéticiens et des constructeurs mécaniciens mènera possiblement à rendre les produits de l'entreprise plus écologiques qu'ils ne le sont et les fera rentrer dans le marché international.

**Introduction :**

Dans ce chapitre nous évoquerons le phénomène de combustion se déroulant dans le foyer et citerons tout mode de transfert de chaleur ayant intervenu dans les échanges thermiques dans la chaudière ainsi que le transfert de chaleur avec changement de phase en vase dont le rôle est pertinent.

**III.1. Combustion :****III.1.1. Définitions :****III.1.1.1. Le pouvoir calorifique :**

Le pouvoir calorifique d'un combustible est l'énergie par unité de masse, dégagée sous forme de chaleur par la réaction de sa combustion. Il s'exprime en joule par kilogramme (J/kg), il peut être volumique et s'exprime alors en joule par mètre cube (J/m<sup>3</sup>). Dans le domaine de la construction, l'unité d'énergie employée est le kilowattheure.

La combustion d'un combustible (bois, gaz, fioul, etc.) produit notamment de la vapeur d'eau. Cette vapeur d'eau passera ultérieurement de l'état gazeux à l'état liquide, elle restituera de l'énergie, appelée chaleur latente de liquéfaction.

- *Le pouvoir calorifique supérieur PCS* du combustible correspond à l'énergie produite par la combustion complète d'un kilogramme de combustible (ou 1m<sup>3</sup> pour le gaz), en tenant compte de la chaleur latente dans la vapeur d'eau (condensation de la totalité de l'eau).

- *Le pouvoir calorifique inférieur PCI* correspond à l'énergie minimale disponible, c'est-à-dire c'est l'énergie produite par la combustion complète d'un kilogramme de combustible (ou 1m<sup>3</sup> pour le gaz), *sans* tenir compte de la chaleur latente dans la vapeur d'eau.

$PCS = PCI + \text{chaleur latente d'évaporation}$

On voit donc que l'écart entre le PCS et le PCI est la chaleur latente.

Et le PCS est donc toujours supérieur au PCI avec un écart d'environ 10% (cet écart varie en fait légèrement en fonction du combustible : de 8% pour le bois à 11% pour le gaz).

### III.1.1.2. Coefficient d'excès d'air :

En pratique, la combustion est loin d'être stœchiométrique, elle s'effectue toujours avec un excès d'air pour qu'elle reste complète malgré les inévitables fluctuations des proportions du mélange et les hétérogénéités de celui-ci.

Cet excès d'air doit être faible car il diminue le rendement, mais par contre une combustion incomplète abaisse considérablement ce dernier et peut en plus provoquer des dépôts de suies.

Un coefficient de richesse est noté par  $\phi$  représente le rapport entre la quantité d'air réellement envoyée dans le foyer noté  $D_{re}$  et la quantité d'air qui est strictement nécessaire notée  $D_{st}$  c'est-à-dire :

$$\phi = D_{re} / D_{st}.$$

Avec :

$D_{re}$  : le dosage réel.

$D_{st}$  : le dosage stœchiométrique.

- Si le brûleur fonctionnant à la stœchiométrie,  $D_{re} = D_{st}$  donc la richesse est égale à 1.
- Si le brûleur fonctionne avec plus de carburant que la stœchiométrie, le dosage réel sera donc supérieur au dosage stœchiométrique, la richesse donc sera supérieure à 1.
- Inversement, si le brûleur fonctionne avec moins de carburant que la stœchiométrie, la richesse sera inférieure à 1.

Cependant, certains motoristes préfèrent parler de coefficient d'excès d'air plutôt que de richesse.

Ce coefficient (noté  $\alpha$ ) est défini par  $\alpha = D_{st} / D_{re} = 1 / \phi$ .

Par définition, Alpha ( $\alpha$ ) se comportera donc à l'inverse de Phi ( $\Phi$ ). Quand le moteur fonctionne avec plus de carburant qu'à la stœchiométrie (donc avec moins d'air), Alpha sera inférieur à 1, et inversement quand le brûleur fonctionne avec moins de carburant, donc avec plus d'air,  $\alpha$  sera supérieur à 1.

### III.1.1.3. Le pouvoir fumigène :

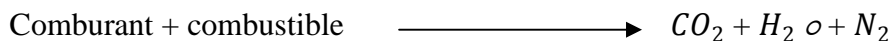
C'est la quantité de fumées qui résulte de la combustion neutre de l'unité de combustible.

Il existe deux types de pouvoirs fumigènes. [13]

- Le pouvoir fumigène SEC :  $V_{f_o}$
- Le pouvoir fumigène HUMIDE :  $V_{f_o'}$

### III.1.2. Définition de la combustion

La combustion est une réaction chimique complète ou partielle du carbone et de l'hydrogène des combustibles usuels par oxydation de l'oxygène. Les produits essentiels de ses réactions sont la chaleur le  $CO_2$ , le  $H_2O$  et aussi de l'azote ( $N_2$ ) qui théoriquement reste neutre dans la réaction de combustion.



La combustion ne peut se produire que lorsque l'on réunit trois éléments : un combustible, un comburant, une énergie d'activation. On appelle ceci le triangle du feu.

Le but de la combustion dans la chaudière est la récupération la plus parfaite possible de l'énergie chimique contenue en puissance dans le combustible. Cette énergie chimique va se dégager sous forme de chaleur c'est un phénomène dit exothermique qui apparait souvent sous forme d'une flamme, cette chaleur va être récupérée dans la chaudière pour produire de la vapeur.

**III.1.2.1. Type de combustible :**

Le combustible se présente sous plusieurs formes : solide, liquide ou gazeux.

- un gaz (butane, propane, gaz de ville, hydrogène...).
- un liquide (essence, gasoil, huile, kérosène...).
- un solide (bois, papier, carton, textile, matière plastique...).

**III.1.2.2. Le comburant :**

C'est en général de l'air ambiant (23%  $O_2$  en volume, 77%  $N_2$  en volume et quelques gaz rares).

**III.1.2.3. Conditions nécessaires pour une combustion parfaite :**

- Une quantité d'air suffisante.
- Un mélange complet d'air et de gaz.
- Une température suffisante pour maintenir la combustion.

Une bonne combustion dépend de l'application de ces conditions.

**III.1.2.4. Les différents types ou aspects de combustion :**

Il existe trois types de combustions différents:

**III.1.2.4.a. Combustion neutre ou stœchiométrique :**

La Combustion stœchiométrique (ou neutre), qui est la référence : elle n'est que théorique, toutes les techniques évoluées tentent de s'en approcher.

Cette combustion s'effectue seulement avec la quantité d'air nécessaire. Les fumées correspondantes à cette combustion sont composées de  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$  et  $N_2$  (les fumées ne contiennent pas d'oxygène).

**III.1.2.4.b. Combustion complète avec excès d'air :**

C'est une combustion complète en présence d'un volume d'air supérieur à celui de la combustion stœchiométrique pour s'assurer que tous les éléments rencontrent de l'oxygène avant d'être évacuer du foyer. Donc combustion oxydante sans production de monoxyde de carbone CO.

- L'excès d'air adopté avec les combustibles liquides et gazeux est sensiblement le même et il est plus faible que celui nécessaire aux combustibles solides.

- On trouve ce type de combustion dans la plupart des applications industrielles. C'est aussi l'objectif à atteindre dans le domaine des chaudières.

**III.1.2.4.c. Combustion réductrice ou en manque d'air :**

La combustion est dite réductrice (ou en défaut d'air) si le volume d'air admet pour la combustion de l'unité de combustible est inférieur au volume d'air stœchiométrique, l'oxygène y est néanmoins totalement utilisé donc pas de présence d'oxygène dans les fumées mais il y a formation de monoxyde de carbone CO. Comme il y a manque d'oxygène il y aura formation des imbrulés solides.

**III.1.2.4.c. Combustion réductrice ou en manque d'air :**

Le choix du combustible pour l'étude proposée est le gaz naturel de HASSI-R'MEL qui est abondant dans notre pays. Ces caractéristiques sont représentées sur le tableau suivant.

[5]

Constituants	Teneur volumique(%)
Méthane $CH_4$	82.52
Ethane $C_2H_6$	7.92
Propane $C_3H_8$	2.06
N-Butane $N - C_4H_{10}$	0.48
I-Butane ISO- $C_4H_{10}$	0.32
N-Pentane $N - C_5H_{12}$	0.11
Hexane+ $C_6H_{14+}$	0.05
Azote $N_2$	5.2
Hélium He	0.15
Dioxyde de carbone $CO_2$	1.19

**Tableau III.1 : composition chimique du gaz naturel de HASSI-R'MEL.**

**III.1.2.5. Masse volumique du gaz naturel: [5]**

$$\rho = 0.796 \text{ Kg/Nm}^3.$$

**III.1.2.6. Pouvoir calorifique inferieur (PCI): [5]**

$$\text{PCI} = 37770.48 \text{ kJ/Nm}^3.$$

**III.1.2.7. Température d'inflammation : [5]**

La température d'inflammation ou point d'inflammabilité (en anglais : *flash point*) est donc définie comme la température la plus basse à laquelle un corps combustible émet suffisamment de vapeurs pour former, avec l'air ambiant, un mélange gazeux qui s'enflamme sous l'effet d'une source d'énergie calorifique telle qu'une flamme pilote, mais pas suffisamment pour que la combustion s'entretienne d'elle-même (pour ceci, il faut atteindre le point d'inflammation). Si l'inflammation ne nécessite pas de flamme pilote, on parle alors d'auto-inflammation.

Pour le gaz naturel de HASSI-R'MEL la température d'inflammation est de l'ordre de 700 °C à 800 °C.

**III.1.3. Equations de la combustion:**

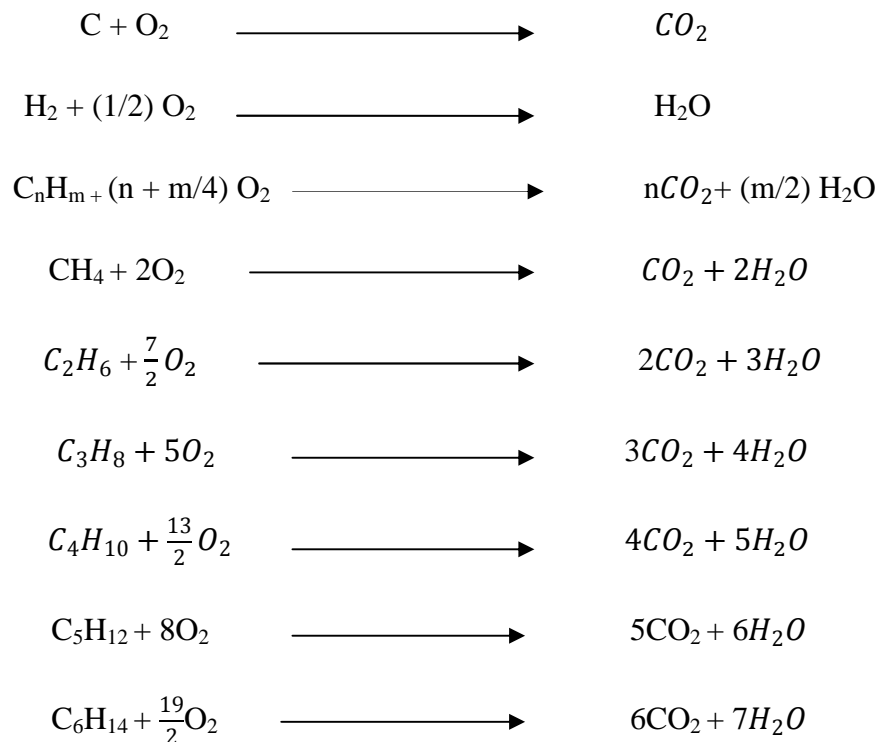
La réaction de combustion est composée de trois éléments qui sont le carbone (C), l'oxygène (O<sub>2</sub>) et l'hydrogène (H).

La quantité de l'oxygène contenue dans l'air admis dans la réaction détermine la nature de combustion.

Cette combustion peut être complète ou incomplète, la combustion est dite complète lorsqu'on a une quantité d'oxygène suffisante qui oxyde les différentes particules de combustibles, tous le carbone du combustible se combine sous forme de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et tout son oxygène (O<sub>2</sub>) sous forme de vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O).

Dans le cas contraire c'est-à-dire la quantité d'oxygène de l'air est insuffisante, nous aurons une partie de carbone qui va former avec l'oxygène le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), et l'autre partie va former le monoxyde de carbone (CO).

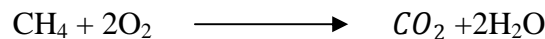
Les réactions chimiques qui résultent la combustion de gaz naturel de HASSI-R'MEL sont les suivantes :



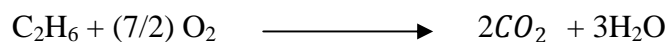
**III.1.4. Quantité d'air nécessaire  $V_a^0$  : [6]**

Elle désigne la quantité d'air strictement nécessaire et suffisante qu'il faut fournir pour assurer la combustion neutre de l'unité de combustible. [Cours Mr Thierry CHASSIN de l'Université Paul Sabatier de Toulouse]. L'air au voisinage du sol est un mélange gazeux homogène. Il est approximativement composé en fraction molaire ou en volume en négligeant les gaz rare contenu dans l'atmosphère de 23% d'oxygène et 77% d'azote. On considère que l'air est pris à une température ambiante de 25<sup>0</sup> c et à une pression de 1.01325 bar.

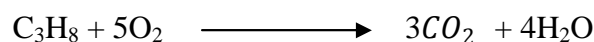
Considérons 1 mole de combustible cherchons alors la quantité d'oxygène nécessaire pour la combustion des différents constituants du combustible considéré, et tenant compte du tableau III.1.

**III.1.4.a. Combustion du méthane  $CH_4$  :**

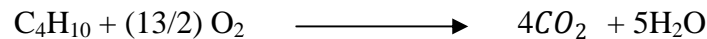
1 mole de combustible contient 0.8252 mole de  $CH_4$  donc le volume d'oxygène nécessaire pour la combustion de cette quantité vaut  $V_{O_2}^{CH_4} = 1.6504 \text{ mole} / \text{mole de combustible}$ .

**III.1.4.b. Combustion d'éthane  $C_2H_6$  :**

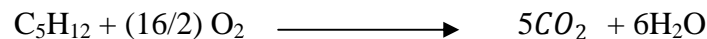
1 mole de combustible contient 0.0792 mole de  $C_2H_6$  donc le volume d'oxygène nécessaire pour la combustion de cette quantité vaut  $V_{O_2}^{C_2H_6} = 0.2772 \text{ mole} / \text{mole de combustible}$ .

**III.1.4.c. Combustion du propane  $C_3H_8$  :**

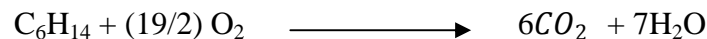
1 mole de combustible contient 0.0206 mole de  $C_3H_8$  donc le volume d'oxygène nécessaire pour la combustion de cette quantité vaut  $V_{O_2}^{C_3H_8} = 0.103 \text{ mole} / \text{mole de combustible}$ .

**III.1.4.d. Combustion du butane  $C_4H_{10}$  :**

1 mole de combustible contient 0.008 mole de  $C_4H_{10}$  donc le volume d'oxygène nécessaire pour la combustion de cette quantité vaut  $V_{O_2}^{C_4H_{10}} = 0.052 \text{ mole} / \text{mole}$  de combustible.

**III.1.4.e. Combustion du pentane  $C_5H_{12}$  :**

1 mole de combustible contient 0.0011 mole de  $C_5H_{12}$  donc le volume d'oxygène nécessaire pour la combustion de cette quantité vaut  $V_{O_2}^{C_5H_{12}} = 0.0088 \text{ mole} / \text{mole}$  de combustible.

**III.1.4.f. Combustion d'hexane  $C_6H_{14}$  :**

1 mole de combustible contient 0.0005 mole de  $C_6H_{14}$  donc le volume d'oxygène nécessaire pour la combustion de cette quantité vaut  $V_{O_2}^{C_6H_{14}} = 0.00475 \text{ mole} / \text{mole}$  de combustible.

Pour l'hélium ( $He$ ) ; l'azote ( $N_2$ ) et le dioxyde de carbone  $CO_2$  restent inertes pendant la réaction donc le nombre de mole d'oxygène nécessaire pour la combustion est :

$$V_{O_2}^B = V_{O_2}^{C_6H_{14}} + V_{O_2}^{C_5H_{12}} + V_{O_2}^{C_4H_{10}} + V_{O_2}^{C_3H_8} + V_{O_2}^{C_2H_6} + V_{O_2}^{CH_4} \quad (\text{III.a})$$

Alors  $V_{O_2}^B = 2.0961 \text{ mole d'oxygène} / \text{mole de combustible.}$

Où  $V_{O_2}^B = 2.0961 \text{ Nm}^3 \text{ d'oxygène} / \text{Nm}^3 \text{ de combustible.}$

Donc  $V_{air}^B = \frac{1}{0.21} * V_{O_2}^B = 9.9816 \text{ Nm}^3 \text{ d'air} / \text{Nm}^3 \text{ de combustible.}$

**III.1.5. Composition des résultats de combustion : [6]**

Dans une réaction à combustion stœchiométrique les résultats de la combustion sont le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), l'eau ( $H_2O$ ) et les gaz inertes l'azote ( $N_2$ ) et l'hélium ( $He$ ).

Le volume des gaz de combustion est donné par la relation suivante :

$$V_g^0 = V_{CO_2}^0 + V_{H_2O}^0 + V_{N_2}^0 + V_{He}^0 \quad (\text{Nm}^3 / \text{Nm}^3 \text{ de combustible}). \quad (\text{III.b})$$

### III.1.5.1. Volume du dioxyde de Carbone $V_{CO_2}^0$ :

Comme la teneur du dioxyde de carbone présent dans l'air est négligeable qui est de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-4}$  en volume. Le volume du gaz carbonique dans le cas général est donné par la relation suivante :

$$V_{CO_2}^0 = CO_2 + CH_4 + \sum n C_n H_m \quad (\text{Nm}^3 / \text{Nm}^3 \text{ de combustible}). \quad (\text{III.c})$$

$CO_2, CH_4, \dots$  : teneurs volumiques des différents composants du combustible gazeux données en (%), tenant compte du tableau (III.1) :

$$V_{CO_2}^0 = 0.0119 + (1 \times 0.8252) + (2 \times 0.0792) + (3 \times 0.0206) + (4 \times (0.0048 + 0.0032)) + (5 \times 0.0011) + (6 \times 0.0005)$$

Donc :  $V_{CO_2}^0 = 1.0978 \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3 \text{ de combustible}.$

### III.1.5.2. Volume de la vapeur d'eau $H_2O$ produite $V_{H_2O}^0$ :

En négligeant l'humidité contenue dans l'air, donc la vapeur qu'on trouve dans les produits de combustion provient de la combustion des hydrocarbures du combustible. Sa valeur est exprimée par la relation suivante :

$$V_{H_2O}^0 = 2 CH_4 + \sum (m/2) C_n H_m \quad (\text{Nm}^3 / \text{Nm}^3 \text{ de combustible}). \quad (\text{III.d})$$

$CH_4 \dots$  teneurs volumiques des différents composants du combustible gazeux données en (%), tenant compte du tableau (III.1) on aura le volume de la vapeur d'eau produite est :

$$V_{H_2O}^0 = (2 \times 0.8252) + (3 \times 0.0792) + (4 \times 0.0206) + (5 \times (0.0048 + 0.0032)) + (6 \times 0.0011) + (7 \times 0.0005)$$

Donc :  $V_{H_2O}^0 = 2.0205 \text{ (Nm}^3 / \text{Nm}^3 \text{ de combustible)}.$

### III.1.5.3. Volume d'azote $V_{N_2}^0$ :

L'azote présent dans les produits de combustion provient de la quantité présente dans l'air et celle présente dans le combustible, donc :

$$V_{N_2}^0 = 0.79 V_a^0 + N_2 \quad \text{Nm}^3 / \text{Nm}^3 \text{ de combustible.}$$

Avec:

**0.79** : représente le pourcentage volumique de  $N_2$  dans l'air.

$N_2$  : pourcentage de  $N_2$  contenue dans le combustible.

$$V_{N_2}^0 = 7.9374 \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3 \text{ de combustible.}$$

#### III.1.5.4. Volume d'hélium $V_{He}^0$ :

Comme l'hélium c'est un gaz inerte, il provient seulement du combustible donc :

$$V_{He}^0 = 0.0015 \text{ Nm}^3 / \text{Nm}^3 \text{ de combustible.}$$

#### *Volume des produits d'une combustion stœchiométrique*

Finalement le volume des produits d'une combustion stœchiométrique sera alors compte tenu de la relation (III.b).

$$V_g^0 = 11.0572 \quad \text{Nm}^3 / \text{Nm}^3 \text{ de combustible.}$$

Dans la pratique la combustion est loin d'être stœchiométrique. Et comme le mélange de l'air fourni avec le combustible ne peut pas être réalisé complètement réellement, il faut fournir plus d'air qu'il ne le serait théoriquement nécessaire ; par conséquent le foyer fonctionne avec un excès d'air.

Un trop grand excès d'air est défavorable car il diminue la température du foyer.

Pour élargir la plage d'utilisation de la chaudière où le volume d'air aspiré par les ventilateurs injecté dans le foyer, viendrait à changer pour des raisons de chute de tension, on varie la valeur du coefficient d'excès d'air par les valeurs suivantes :

1,0 ; 1,05 ; 1,10 ; 1,15 ; 1,20

Formules	$\alpha=1$	$\alpha=1.05$	$\alpha=1.10$	$\alpha=1.15$	$\alpha=1.20$
Volume réel du CO <sub>2</sub> : $V_{CO_2} = V_{CO_2}^0$	1.0978	1.0978	1.0978	1.0978	1.0785
Volume réel d'H <sub>2</sub> O : $V_{H_2O} = V_{H_2O}^0$	2.0205	2.0205	2.0205	2.0205	2.0205
Volume réel du N <sub>2</sub> : $V_{N_2} = 0.79\alpha V_a^0 + N_2$	7.9374	8.3317	8.7260	9.1202	9.5145
Volume réel d'He : $V_{He} = V_{He}^0$	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015
Volume d'O <sub>2</sub> en excès $V_{O_2} = 0.21 (\alpha - 1) V_a^0$	0.0000	0.1048	0.2096	0.3144	0.4192
Volume réel des gaz de combustion : $V_g = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{He} + V_{O_2}$	11.0572	11.5563	12.0554	12.5544	13.0342

**Tableau III.2 : Tableau récapitulatif du calcul du bilan matériel de la combustion.**

**Remarque :**

Les calculs précédents sont établis dans les conditions normales de température et de pression, et pour déterminer le volume final des produits de combustion à une température quelconque et une pression donnée on utilise la relation suivante : [6]

$$V_G = V_g \left( \frac{T + 273.15}{273.15} \right) \tag{III.e}$$

Avec :

T : température donnée en °C.

V<sub>G</sub> : volume des gaz de combustion à la température T.

**III.1.6. Enthalpies des produits de combustion H<sub>g</sub> :**

L'enthalpie réelle des produits de combustion par Nm<sup>3</sup> de combustible est donnée par la formule suivante : [6]

$$H = H_g^0 + (\alpha - 1) H_a^0 \tag{III.f}$$

Où :

$(\alpha-1) H_a^0$  : enthalpie théorique de l'air en excès dans les produits de combustion.

Avec :

$$H_a^0 = V_a^0 C_a T_a \quad (\text{III.g})$$

$T_a$  : Température de l'air dans les produits de combustion.

$V_a^0$  : Volume théorique de l'air.

$C_a$  : Chaleur spécifique de l'air à pression constante.

$H_g^0$  : Enthalpie théorique des gaz de combustion.

$H_g$  : Enthalpie réelle des produits de combustion.

Avec :

$$H_g^0 = V_{CO_2}^0 C_{CO_2} T_{CO_2} + V_{H_2O}^0 C_{H_2O} T_{H_2O} + V_{N_2}^0 C_{N_2} T_{N_2} + V_{He}^0 C_{He} T_{He} \quad (\text{III.h})$$

Pour les températures des produits de combustion on a :

$$T_{CO_2} = T_{H_2O} = T_{N_2} = T_{He} = T_a \quad (\text{III.i})$$

$$\text{Donc : } H_g^0 = \sum_{ii} (V_i^0 C_i) T_a. \quad (\text{III.j})$$

Finalement, l'expression de l'enthalpie des gaz de combustion est :

$$H_G = [\sum_i (V_i^0 C_i) + (\alpha-1) V_a^0 C_a] T_a \quad (\text{III.k})$$

T (°C)	$H_{CO_2}$ (Kj/m <sup>3</sup> )	$H_{H_2O}$ (Kj/m <sup>3</sup> )	$H_{N_2}$ (Kj/m <sup>3</sup> )	$H^{\circ}_{air}$ (Kj/m <sup>3</sup> )	$H_G = H_g^0 + (\alpha - 1)H_a^0$ (Kj/m <sup>3</sup> )					
					$\alpha=1$	$\alpha=1,05$	$\alpha=1,10$	$\alpha=1,15$	$\alpha=1,20$	$\alpha=1,25$
27	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
77	101,2693	36,5820	552,7962	695,2897	690,6475	725,4120	760,1765	794,9410	829,7054	864,4699
127,00	220,9335	162,1127	1179,5000	1484,6000	1562,5462	1636,7762	1711,0062	1785,2362	1859,4662	1933,6962
177,00	357,3345	354,0581	1872,0000	2363,8000	2583,3926	2701,5826	2819,7726	2937,9626	3056,1526	3174,3426
227,00	509,4824	561,1338	2624,7000	2358,3000	3695,3162	3813,2312	3931,1462	4049,0612	4166,9762	4284,8912
277,00	676,5420	785,4702	3432,7000	3309,8000	4894,7122	5060,2022	5225,6922	5391,1822	5556,6722	5722,1622
327,00	856,0387	1024,8000	4293,6000	5022,8000	6174,4387	6425,5787	6676,7187	6927,8587	7178,9987	7430,1387
377,00	1046,3000	1283,3000	5201,5000	6574,0000	7531,1000	7859,8000	8188,5000	8517,2000	8845,9000	9174,6000
427,00	1248,6000	1554,4000	6159,0000	7784,4000	8962,0000	9351,2200	9740,4400	10129,6600	10518,8800	10908,1000
477,00	1462,3000	1841,8000	7152,4000	9049,7000	10456,5000	10908,9850	11361,4700	11813,9550	12266,4400	12718,9250
527,00	1687,7000	2139,3000	8198,9000	10378,0000	12025,9000	12544,8000	13063,7000	13582,6000	14101,5000	14620,4000
577,00	1921,8000	2454,3000	9273,8000	11743,0000	13649,9000	14237,0500	14824,2000	15411,3500	15998,5000	16585,6500
627,00	2166,8000	2782,6000	10399,0000	13170,0000	15348,4000	16006,9000	16665,4000	17323,9000	17982,4000	18640,9000
677,00	2420,3000	3113,8000	11559,0000	14642,0000	17093,1000	17825,2000	18557,3000	19289,4000	20021,5000	20753,6000
727,00	2680,8000	3476,4000	12743,0000	16144,0000	18900,2000	19707,4000	20514,6000	21321,8000	22129,0000	22936,2000
827,00	3227,0000	4206,3000	15234,0000	19298,0000	22667,3000	23632,2000	24597,1000	25562,0000	26526,9000	27491,8000
927,00	3806,5000	4277,5000	17870,0000	22644,0000	25954,0000	27086,2000	28218,4000	29350,6000	30482,8000	31615,0000
1027,00	4406,2000	5827,2000	20571,0000	26068,0000	30804,4000	32107,8000	33411,2000	34714,6000	36018,0000	37321,4000
1127,00	5039,5000	6674,1000	23436,0000	29710,0000	35149,6000	36635,1000	38120,6000	39606,1000	41091,6000	42577,1000
1227,00	5682,5000	7637,0000	26294,0000	33355,0000	39613,5000	41281,2500	42949,0000	44616,7500	46284,5000	47952,2500
1327,00	6361,2000	8551,4000	29358,0000	37289,0000	44270,6000	46135,0500	47999,5000	49863,9500	51728,4000	53592,8500

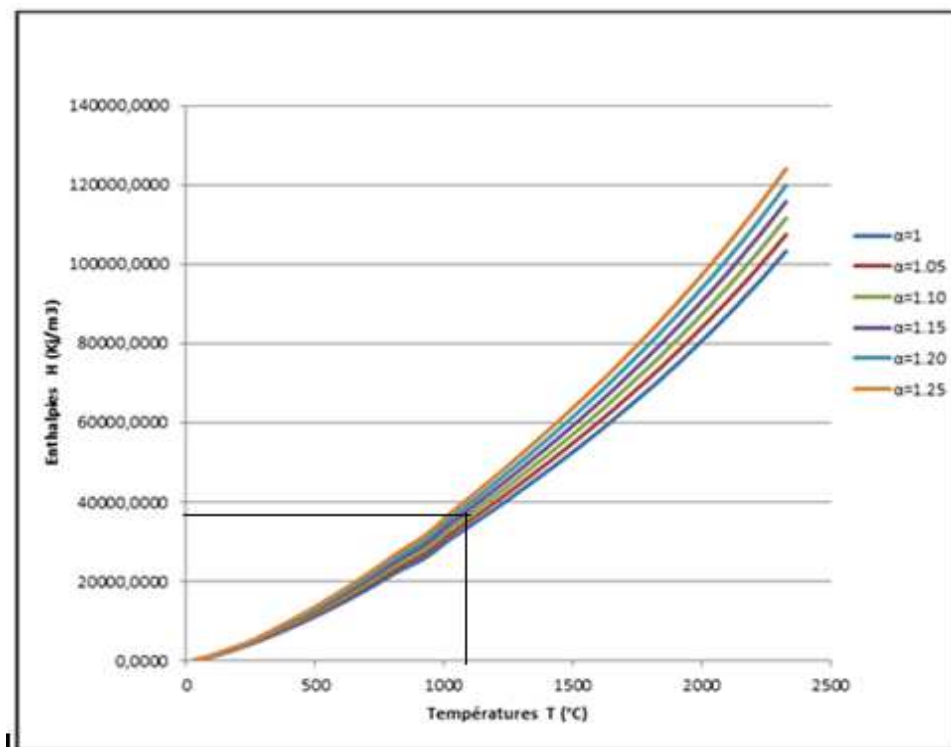
T (°C)	$H_{CO_2}$ (Kj/m <sup>3</sup> )	$H_{H_2O}$ (Kj/m <sup>3</sup> )	$H_{N_2}$ (Kj/m <sup>3</sup> )	$H^{\circ}_{air}$ (Kj/m <sup>3</sup> )	$H_G = H^{\circ}_g + (\alpha - 1)H^{\circ}_a$ (Kj/m <sup>3</sup> )					
					$\alpha=1$	$\alpha=1,05$	$\alpha=1,10$	$\alpha=1,15$	$\alpha=1,20$	$\alpha=1,25$
1527,00	7756,2000	10666,0000	35570,0000	45291,0000	53992,2000	56256,7500	58521,3000	60785,8500	63050,4000	65314,9500
1627,00	8518,2000	11806,0000	38808,0000	49470,0000	59132,2000	61605,7000	64079,2000	66552,7000	69026,2000	71499,7000
1727,00	9373,5000	12996,0000	42224,0000	53948,0000	64593,5000	67290,9000	69988,3000	72685,7000	75383,1000	78080,5000
1827,00	10284,0000	14236,0000	45623,0000	58385,0000	70143,0000	73062,2500	75981,5000	78900,7500	81820,0000	84739,2500
1927,00	11282,0000	15706,0000	49101,0000	62993,0000	76089,0000	79238,6500	82388,3000	85537,9500	88687,6000	91837,2500
2027,00	12385,0000	17323,0000	52605,0000	67623,0000	82313,0000	85694,1500	89075,3000	92456,4500	95837,6000	99218,7500
2127,00	13616,0000	19127,0000	56135,0000	72516,0000	88878,0000	92503,8000	96129,6000	99755,4000	103381,2000	107007,0000
2227,00	14993,0000	21032,0000	59819,0000	77701,0000	95844,0000	99729,0500	103614,1000	107499,1500	111384,2000	115269,2500
2327,00	16489,0000	23269,0000	63510,0000	83011,0000	103268,0000	107418,5500	111569,1000	115719,6500	119870,2000	124020,7500

Tableau III.3 : Valeurs des enthalpies des produits de combustion en fonction de l'excès d'air.

### III.1.7. Température théorique de combustion $T_c$ :

La température théorique de combustion ne serait réellement atteinte que dans une enceinte adiabatique, c'est le cas idéal où il n'y a pas de pertes. Cette température se calcule en exprimant la chaleur dégagée par la combustion qui est égale au pouvoir calorifique inférieur du combustible (PCI), l'est également à la chaleur d'échauffement des produits de combustion ( $H_c$ ).

$$PCI = H_c = H_G = H_g^0 + (\alpha - 1)H^{\circ}a \quad [6] \quad (III.1)$$



**Figure III.1 : Diagramme (H, T) : Variation de l'enthalpie des gaz brûlés en fonction de la température**

- D'après le diagramme précédent (H,T) la température des gaz  $T_c$  est pour un coefficient d'excès d'air de  $\alpha=1.10$  est :  $T_c=1100^\circ\text{C}$ .

**III.1.8. Température théorique de combustion  $T_c$  pour différentes valeurs d'excès d'air :**

D'après le diagramme précédent la température de combustion  $T_c$  pour différents coefficients d'excès d'air est donnée par le tableau suivant :

Coefficient d'excès d'air ( $\alpha$ )	Température de combustion $T_c$ (°C)
1.00	1175
1.05	1130
1.10	1100
1.15	1075
1.20	1050
1.25	1025

**Tableau III.4 : tableau récapitulatif de la température théorique de combustion  $T_c$  pour différentes valeurs de l'excès d'air.**

**Remarque :**

D'après le tableau précédent on remarque que la température de combustion  $T_c$  diminue quand l'excès d'air envoyé dans le foyer augmente qui veut dire que le rendement de la chaudière diminue.

**III.2. Notions générales sur le transfert de chaleur :**

Il y a trois modes de transferts de chaleur notamment la conduction, la convection et le rayonnement.

**III.2.1. La conduction :**

La conduction est la propagation de chaleur sans déplacement de matière. Elle est générée par la vibration des atomes ou des molécules et par le mouvement des atomes.

C'est un mode de transfert régi par la loi de Fourier dans un corps solide indéformable [7]:

$$\Phi = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (\text{III.1})$$

Ou :

$S$  : est la surface en  $m^2$ .

$\lambda$ : conductivité thermique en  $w/(m.k^\circ)$ .

$\frac{dT}{dx}$  : le gradient de température.

**III.2.2. La Convection :**

Un mode qui a lieu par le mouvement du fluide sous l'effet de la différence de températures  $\Delta T$ .

Elle est régie par la loi de Newton [7]

$$\Phi = h. S. (T_p - T_\infty) \quad (\text{III.2})$$

$h$  = coefficient d'échange convectif en  $W/m^2.\text{°c}$ .

$S$  = surface d'échange convectif en  $m^2$ .

$T_p$ = température de la paroi en  $\text{°c}$ .

$T_\infty$ = température au loin en  $\text{°c}$ .

On parlera de convection libre (naturelle) quand le mouvement s'effectue sous l'influence des différences de densités dues à des différences de températures au sein du fluide. Il en résulte une convection laminaire ou turbulente, suivant la valeur du nombre de Grashof ou de Rayleigh. Ou on parlera de convection forcée qui est un phénomène pour lequel le mouvement est dû à l'action des forces extérieures telle une pompe ou un ventilateur. L'écoulement est alors laminaire ou turbulent suivant la valeur du nombre de Reynolds.

Il existe aussi la convection mixte comme son nom l'indique les deux phénomènes de convection coexistent, le mouvement du fluide résulte par des forces internes et externes.

### III.2.3 Le rayonnement :

Seul mode de transfert de chaleur qui ne nécessite pas un support matériel. Il peut avoir lieu entre deux corps placés dans le vide. La chaleur est véhiculée par des ondes électromagnétiques dont la puissance par unité de surface est évaluée par la loi de Stefan Boltzman [7] :

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{III.3})$$

Où :

$\sigma$  : La constante de Stephan Boltzmann vaut (dans le système international)  
 $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ (Wm}^{-2}\text{K}^{-4}\text{)}$

T: étant exprimé en kelvin (K)

- Les seuls gaz qui peuvent avoir un rayonnement appréciables sont le  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  et quelque hydrocarbures. Le  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  sont les gaz qui interviennent en proportion notable dans le rayonnement des gaz de combustion. La variation de l'émissivité de ces deux gaz en fonction de la température, pour diverses valeurs d'épaisseur de couche, est montrée sur les figures (III.2) et (III.3).
- On appelle épaisseur de couche  $\varepsilon_T$ , la quantité de pression des gaz ( $P_G$ ) qu'on multiplie par l'épaisseur de gaz noté L (comme notée sur les figures (III.2) et (III.3)).
- Le facteur d'émission se trouve modifié lorsque la pression totale n'est plus une 1 atmosphère. Dans ce cas il devra être calculé en tenant compte d'un facteur de correction montré par les abaques des figures (III.4) et (III.5)

Lorsque les deux gaz sont mélangés  $\varepsilon_T$  devient :

- **Pour de faibles concentrations :**

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (\text{III.4})$$

- **Pour de grandes concentrations :**

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta\varepsilon. \quad (\text{III.5})$$

$\Delta \varepsilon$  est déterminable à partir des courbes de la figure (III.6). [6]

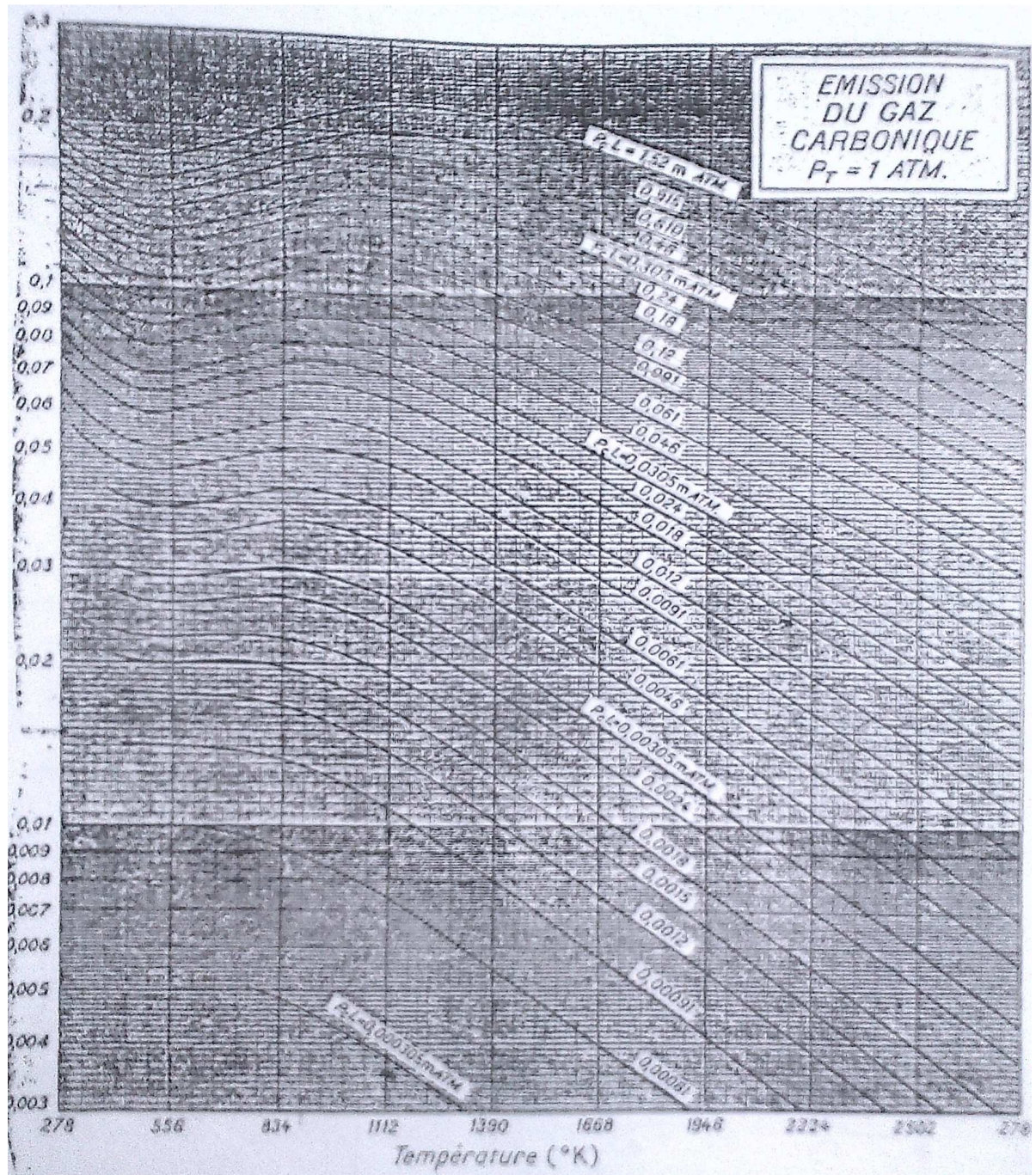


Figure III.2. Facteur total d'émission du gaz carbonique.



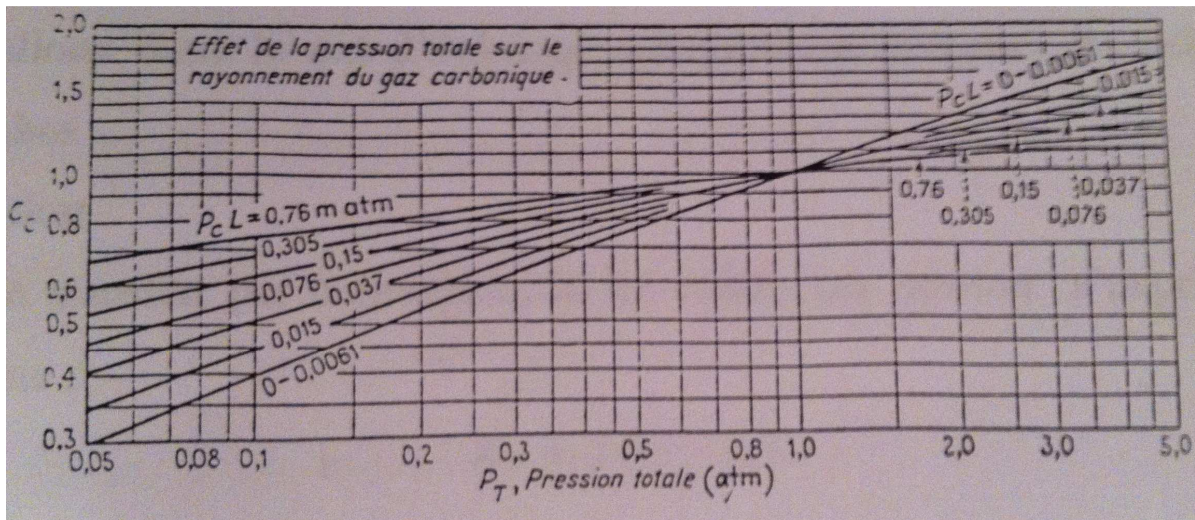


Figure III.4. Facteur correctif  $C_c$  pour convertir le facteur total d'émission du  $\text{CO}_2$  sous une atmosphère de pression totale en facteur total d'émission sous une pression  $P_T$  atmosphère.

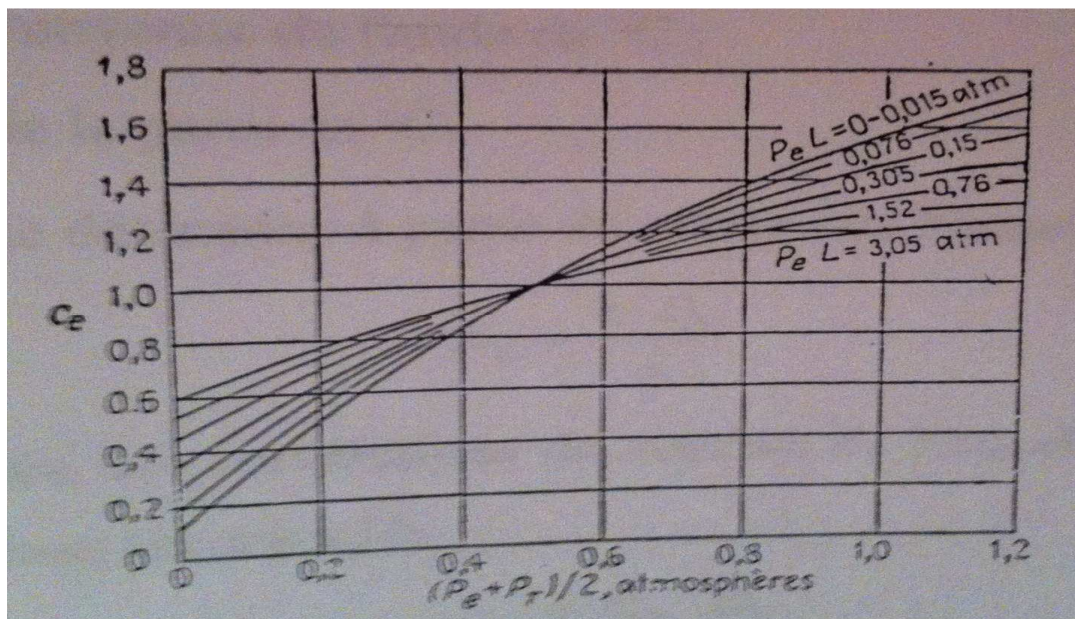
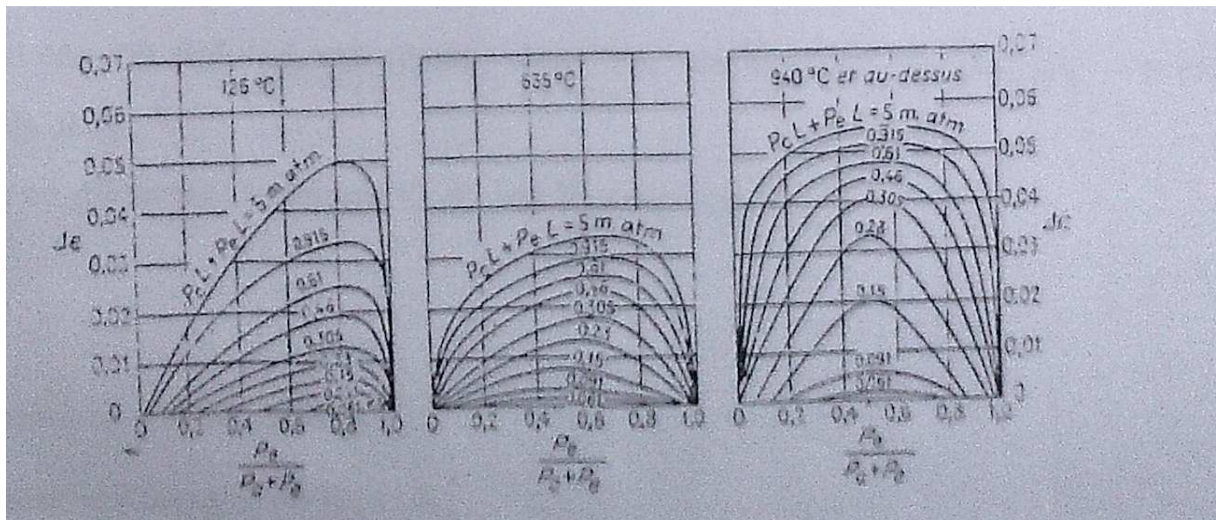


Figure III.5. Facteur correctif  $C_e$  pour convertir le facteur total d'émission de l'eau en valeur de  $P_e$  et  $P_T$  autres que 0 et 1atm, respectivement.



**Figure III.6. Correction du facteur total d'émission du gaz due au chevauchement des spectres de la vapeur d'eau et du gaz carbonique**

### III.3. Généralités sur la formation de la vapeur d'eau :

Les transitions de phases ou changements d'état sont connus depuis très longtemps mais, du fait de la complexité des phénomènes physiques mis en jeu, ils font toujours l'objet d'un grand nombre d'études. Lors du changement d'état liquide-vapeur, il apparaît des discontinuités des variables d'état caractérisant chaque phase.

Notons qu'auparavant, du point de vue des échanges thermiques seul la Caléfaction qui intéressait l'industrie de la trempe des métaux. Rappelons que c'est un phénomène par lequel une goutte de liquide projetée sur une plaque de métal fortement chauffée prend la forme d'une lentille tournant en spirale et se vaporisant.

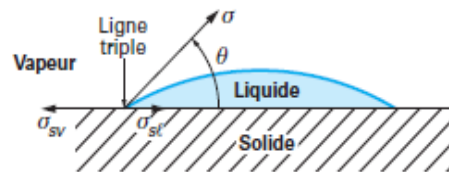
Lorsque la chaleur est appliquée à une surface en contact avec un liquide, si la température de la paroi est suffisamment au-dessus de la température de saturation un phénomène de transfert thermique est enregistré avec un changement de phase liquide-vapeur associé à la formation des bulles qui correspond à l'ébullition.

L'ébullition permet d'atteindre des densités de flux élevées (autrement dit les coefficients d'échange prennent des valeurs très élevées pour un liquide en ébullition) avec des écarts de température relativement faibles.

### III.3.1. Théorie élémentaire de la formation des bulles : [7]

Considérons une bulle de vapeur sphérique (rayon R). la loi de Laplace nous apprend que les forces de tension superficielle  $\sigma$  font régner à l'intérieur de la cavité une surpression  $\Delta P$  ( $P_{int}$  et  $P_{ext}$ ) et les forces de surface, respectivement normales et tangentielles à l'interface, s'écrivent :

$$\Delta P = P_{int} - P_{ext} = \frac{2\sigma}{R} \quad (\text{III.6})$$



**Figure III.7 : bilan des forces de tension superficielle pour une goutte déposée sur un support solide.**

La relation de Laplace peut être généralisée pour des inclusions dont l'interface est caractérisée par des rayons de courbure principaux  $R_1$  et  $R_2$  deux directions orthogonales :

$$P_{int} - P_{ext} = \frac{\sigma}{R_1} + \frac{\sigma}{R_2} \quad (\text{III.7})$$

Si le rayon de courbure d'une bulle est faible, la différence de pression entre les deux phases est élevée. On suppose alors que, sur les parois chauffées sur lesquelles se produit l'ébullition, se trouvent des discontinuités préexistantes (petits trous contenant de l'air piégé, défauts locaux de mouillabilité, etc...) qui servent de Germes favorisant la naissance des bulles. Ces points privilégiés s'appellent Sites et ils s'amortissent avec la différence : température de paroi- température d'ébullition. Cette différence doit être au moins quelques degrés pour que l'ébullition puisse se déclencher.

### III.3.2. L'ébullition en eau stagnante ou en « vase » (Pool Boiling) :

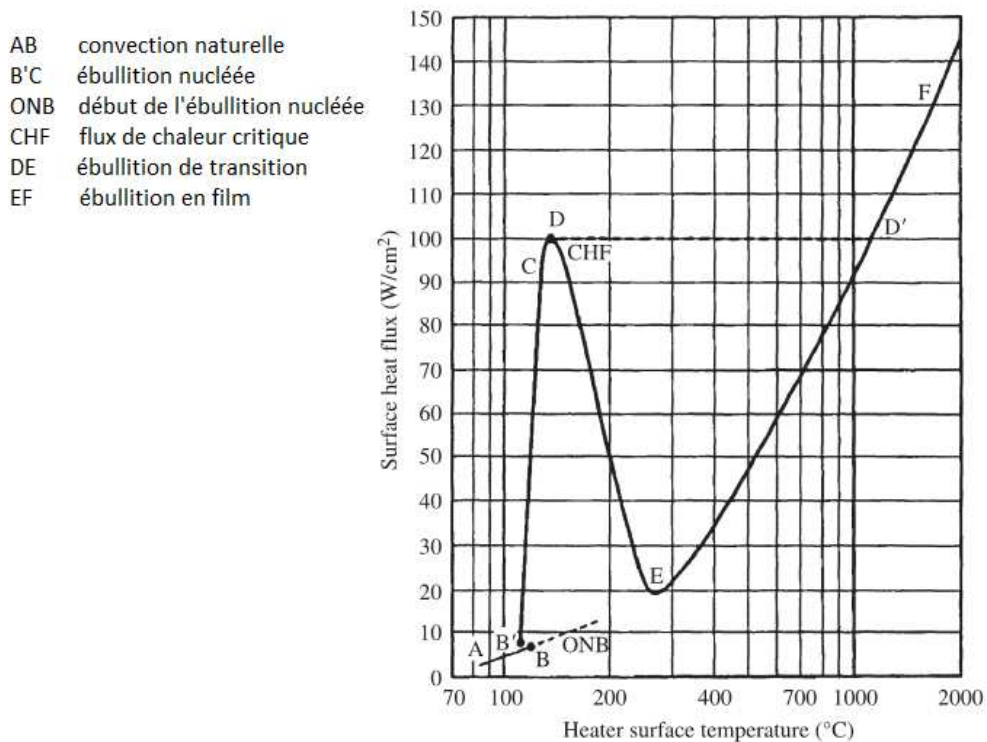
Un élément chauffant plongé dans de l'eau et porté à une température supérieure à la température d'ébullition, permettra d'effectuer une étude descriptive du phénomène d'ébullition en vase.

On considèrera deux cas, suivant que la masse d'eau dans son ensemble aura été ou non portée au préalable à la température d'ébullition. On supposera que l'eau est pure et désaérée. On aura une relation entre la densité de flux transmise par l'élément chauffant  $\phi$ , à la différence de température entre la paroi de cet élément et l'eau

$$\Delta = \dots \tag{III.8}$$

**III.3.2.1. Les régimes d'ébullition, la courbe de Nukiyama :**

Lorsqu'une quantité d'eau est chauffée par une paroi chauffante, la densité de flux de chaleur  $\phi$  est habituellement tracée par rapport à la surchauffe  $\Delta$ . Premièrement construit par Nukiyama (1934) le chauffage était à flux thermique imposé. Par contre, un chauffage à température imposée comme celui réalisé par Drew et Müller en 1937 permet le traçage de la courbe figure III.8 appelée aussi *la courbe de Nukiyama* [7] :



**Figure III.8: Nukiyama's boiling curve (heat transfer hand book).**

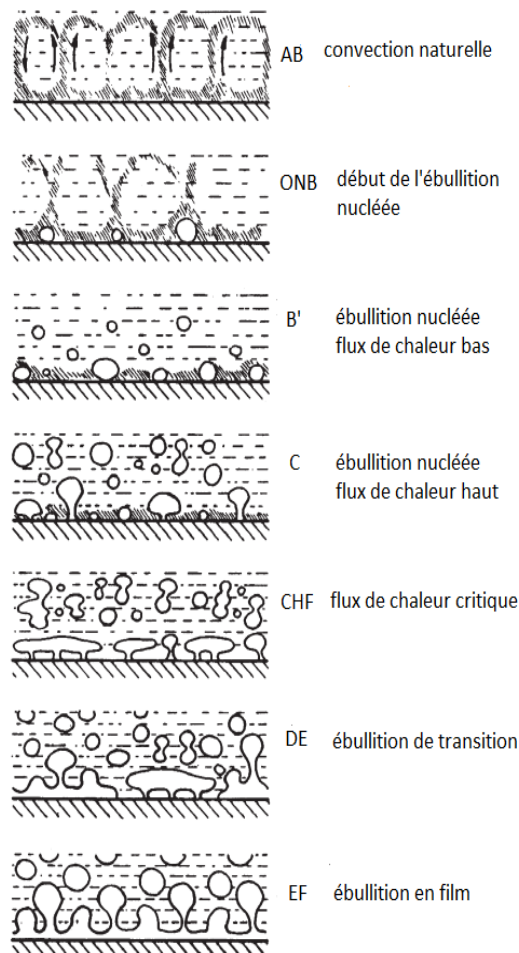
Où quatre régimes de transfert de chaleur peuvent être identifiés et schématisés ci-après sur la figure III.9 :

1. convection naturelle : Elle est caractérisée par une phase de convection naturelle de la surface chaude au liquide saturé sans formation de bulles à la surface

2. ébullition nucléée : Convection naturelle diphasique dans laquelle des bulles nucléées apparaissent, croissent et se dirigent vers la surface chauffante

3. ébullition de transition : C'est un régime intermédiaire entre l'ébullition nucléée et les régimes d'ébullition en film.

4. ébullition en film : Ce mode est caractérisé par une couche stable de vapeur qui est formée entre surface chauffante et le liquide, telles que les bulles formées à la surface libre et non pas à la paroi.



Régimes d'ébullition en vase

**Figure III.9 : Régimes d'ébullition en vase.**

AB : Bien que la température de paroi dépasse de quelques degrés la température d'ébullition, il n'y a pas encore naissance de bulles, puisque nous avons vu qu'une certaine surchauffe était nécessaire pour « amorcer les germes ». L'échange entre la paroi chauffante et l'eau se fait par convection naturelle et obéit à la loi de Newton: [7]

$$\varphi = h(T_p - T_{sat}) \quad \text{Avec} \quad h = c \left[ \frac{T_p - T_{sat}}{l} \right]^{0.25}$$

(III.9)

$c$  : constante dépendant de la géométrie du système et de la nature du liquide (pour l'eau :  $130 \leq c \leq 200$ ).

$l$  : Dimension caractéristique de la paroi chauffante (diamètre dans le cas d'un tube, hauteur dans le cas d'une plaque verticale).

Le coefficient d'échange de chaleur  $h$  en convection naturelle peut être évalué à partir de la corrélation de Churchill et Chu faite en 1975 qui apparaît dans le tableau III.5.

B'C : au point B' apparaissent des petites bulles de vapeur. Aux faibles flux, les bulles se détachent et implosent lors de leur ascension dans le liquide saturé. Lorsque le flux augmente, la quantité de vapeur formée croît à partir de points isolés de la paroi, appelées « sites de nucléation » c'est « l'ébullition nucléée à bulles isolées ». Le nombre  $N$  de sites par mètre carré est donné par la formule empirique suivante : [7]

$$N = 1.2 * 10^2 \varphi^2 p \quad \text{(III.10)}$$

$p$  : étant la pression exprimée en bar

Il faut, en effet, que la surchauffe ( $T_p - T_{sat}$ ) de la paroi atteigne une certaine valeur liée à la tension superficielle  $\sigma$  entre le liquide et la vapeur et au rayon de la cavité  $r_{cav}$  d'où s'échappera le chapelet de bulles. En première approximation la surchauffe  $\Delta T_{sat}$  nécessaire pour amorcer la nucléation sur une cavité de rayon  $r_{cav}$  est donnée par la relation:

$$\Delta T_{sat} = T_p - T_{sat} - \frac{2\sigma T_{sat}}{r_{cav} \cdot L_v \cdot \rho_v} \quad \text{(III.11)}$$

avec  $L_v$  : chaleur (enthalpie)massique de vaporisation.

$\rho_v$  : masse volumique de la vapeur

CD : on passe des bulles isolées aux bulles coalescées et à des poches de vapeur. La proportion de vapeur présente sur la paroi augmente jusqu'au point D dénommé point critique.

Durant cette phase, la diffusion de la chaleur à l'interface est un facteur limitant. Puis la bulle prend une forme plus sphérique contrôlée par la tension de surface. Lorsque la bulle atteint son diamètre de détachement ( $d = d_D$ ) elle monte en entraînant avec elle une partie de la couche limite thermique dans son sillage. Ainsi, aux échanges par chaleur latente s'ajoutent des échanges convectifs locaux intenses dus à une des traductions périodiques de la couche limite et un transport de chaleur.  $h = \frac{\varphi}{\Delta T_{sat}}$  est nettement (B'D) plus élevé en ce régime qu'en convection naturelle (AB).

Plusieurs savants ont proposé des relations pour ce régime et parmi eux : Rosenhow(2), Cooper(3)(7), Stephan et Abdelsalam(4), Nusselt(5) et Nishikawa(6) pour le calcul de h en ébullition nucléée sont mentionnées dans le tableau (III.5).

D : la vapeur formée en grande quantité empêche le liquide de remouiller la paroi et d'assurer son refroidissement. A flux imposé la température de la paroi augmente brusquement du point C au point E (de plusieurs centaines de degrés Celsius). Si la température de la paroi au point E est supérieure à sa température de fusion, il est détruit. Le D est appelé point critique ; il lui correspond un flux critique, qui est le flux thermique maximal transmis en ébullition nucléée et sans risquer un endommagement de la paroi. On l'appelle communément aussi crise d'ébullition (burnout, peak heat flux, departure from nucleate boiling, critical heat flux). Ce régime est représenté par les corrélations de Kutateladze (8), Sun et Lienhard (9) du tableau(III.5).

DE : régime mal défini où le fil chauffant est baigné périodiquement par le liquide, ce qui empêche la formation d'une gaine de vapeur continue autour du fil chauffant. Ce régime est dit «ébullition de transition». Ce régime est caractérisé par la présence de grosses masses de vapeur sur la paroi. De fortes fluctuations du flux et de la température de la paroi sont observées. L'extraction du flux par chaleur latente devient prépondérante par rapport à celle due aux effets convectifs.

E : point correspondant au point dit de flux thermique minimal ou de température minimale de film stable. Sa valeur est déterminée par la relation de Brenson, Lienhard et Wong (9) du tableau(III.5).

Au-delà du point E autrement schématisé par EF : le fil chauffant est entouré d'une gaine de vapeur d'où s'échappent régulièrement des bulles de vapeur ce régime est appelé « ébullition en film » ou bien « ébullition pelliculaire ».

Bromley, Westwater et Breenont ont proposé les corrélations représentés dans le tableau (III.5),ci-après, numéro (10).

- **Phénomène d'hystérésis :**

La courbe d'ébullition présente un phénomène d'hystérésis, qui a été observé par de nombreux auteurs. Ce phénomène apparaît lorsque le flux thermique est imposé par valeur croissante depuis une valeur nulle jusqu'à des valeurs élevées (flux critique), puis par valeur décroissante.

La courbe obtenue par valeur décroissante du flux est toujours située plus à gauche que celle à flux croissant. Ceci est dû au fait que, à flux décroissant, le nombre de sites de nucléation actifs reste plus élevé. Il est possible d'éliminer cet effet par cyclage. Les courbes d'ébullition sont, dans la plupart des cas, données à flux décroissant.

Numéro	Régime d'ébullition	Corrélation	Domaine de validité	Nom
1	Convection naturelle	$Nu_{D,l} = \left\{ 0.60 + \frac{0.337 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr_l)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$	$10^{-5} < Ra_D < 10^{12}$	Churchill et Chu (1975) [8]
2	Ebullition nucléé	$\frac{c_{pl} \cdot (T_p - T_{sat})}{h_{lv}} = C_{sf} \left[ \frac{\dot{q}}{\mu_l h_{lv}} \cdot \left( \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \right)^{1/2} \right]^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_l c_{pl}}{\lambda_l} \right)^m$		Rohsenow [7]
3		$h = \frac{\varphi}{T_p - T_{sat}}$ $= 55 P_R^{0.12-L} \varepsilon_p (-L_g P_R)^{-0.55} M^{-0.5} \varphi^{2/3}$		Cooper (1984) [10]
		<b>Eau :</b> $Nu = 2.46 * 10^6 \zeta_1^{0.673} X_4^{-1.58} X_3^{1.26} X_8^{5.22}$	$10^{-4} \leq p/p_{crit} \leq 0.886$	Stephan et

4			et $\theta = 45^\circ$	Abdelsalam (1980) [9]
	<b>Hydrocarbures :</b>	$Nu = 0.0546(X_6^{0.6} X_1)^{0.67} X_8^{4.33} X_4^{0.248}$	$5.7 * 10^{-3} \leq p/p_{crit} \leq 0.9$ et $\theta = 35^\circ$	
	<b>Fluides cryogéniques :</b>	$Nu = 4.82 X_1^{0.624} X_7^{0.117} X_5^{0.257} X_3^{0.374} X_4^{-0.329}$	$4 * 10^{-3} \leq p/p_{crit} \leq 0.97$ et $\theta = 1^\circ$	
	<b>Fluides frigorigènes :</b>	$Nu = 207 X_1^{0.745} X_5^{0.581} X_6^{0.533}$	$3 * 10^{-3} \leq p/p_{crit} \leq 0.78$ et $\theta = 35^\circ$	
5		$Nu = \frac{hD_b}{\lambda_l}$		Nusselt [7]
6		$h = \frac{31.4 p_{crit}^{1.5}}{\tilde{M}^{1/10}} (8R_p)^{0.2(1-p/p_{crit})} \frac{(p/p_{crit})^{0.23} q^{4/5}}{[1 - 0.99(p/p_{crit})]}$	$R_p = 0.125 \text{ am}$	Nishikawa (1982) [9]
7		$\frac{\dot{q}^{1/3}}{\Delta T_{sat}} = 55 \left(\frac{p}{p_{crit}}\right)^{0.12-0.21lgR_p} \left(-\ln \frac{p}{p_{crit}}\right)^{-0.55} \tilde{M}^{-0.5}$		Cooper (1984) [7]
8	Crise d'ébullition critique)	$\varphi_{BO} = KL_v \sqrt{\rho_v} \sqrt{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}$		Kutateladze [9]
		$\varphi_c = [0.116 + 0.3 \exp(-3.44r^{*1/2})] L_v \rho_v^{1/2} [\sigma (\rho_l - \rho_v) g]^{1/4}$ $r^* = r \left[ \frac{\sigma}{g} (\rho_l - \rho_v) \right]^{-1/2}$		Sun et Lienhard [9]
9	Ebullition de transition et flux thermique	$\dot{q}_{min,h} = 0.09 \frac{\rho_l}{\rho_v} h_{lv} \left[ \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{(\rho_l + \rho_v)^2} \right]^{1/4}$		Brenson [9]
	Ebullition en film	$\dot{q}_{min} = 0.515 \left\{ \frac{18}{(R/\lambda)^2 [(R/\lambda)^2 + 1]} \right\} \dot{q}_{min,h}$		Lienhard et Wong [9]

10	$h_{Bromley} = 0.62 \left[ \frac{\lambda_v^3 \rho_v (\rho_l - \rho_v) g L'_v}{\mu_v (T_p - T_{sat}) D} \right]$ <p>Avec <math>L'_v = r_v \left[ 1 + 0.34 \frac{c_{p,c}(T_p - T_{sat})}{L_v} \right]</math></p>	$r^* > 3.52$	Bromley [9]
	$h = \left[ \left( 0.661 + \frac{0.243}{r^*} \right) (r^*)^{1/4} \right] h_{Bromley}$	$r^* < 3.52$	Westwater et Breen[9]

Tableau III.5 : tableau de quelques corrélations valables dans les zones d'ébullition pour une surface chauffante tubulaire de rayon R.

**III.3.2. Convection naturelle en phase liquide dans un cylindre horizontal :**

Pour un cylindre chauffant horizontal de diamètre D baigné par un liquide l , le coefficient d'échange de chaleur h en convection naturelle peut être évalué à partir de la corrélation de Churchill et Chu (1975) : [11]

Où :

$$Nu_{D,l} = \frac{h \cdot D}{\tilde{e}_l} = \frac{\ddot{o} \cdot D}{\Delta T_{sat} \cdot \tilde{e}_l} \tag{III.12}$$

$$Ra_D = \frac{g \cdot \hat{a}_l \Delta T_{sat} \cdot D^3}{\tilde{o}_l \cdot a_l} \tag{III.13}$$

$$Pr_l = \frac{\tilde{o}_l}{a_l} \tag{III.14}$$

Avec :

g: Accélération à la pesanteur

$\tilde{e}_l$  : Conductivité thermique du liquide

$a_l$  : Diffusivité thermique du liquide

$\hat{a}_l$  : Coefficient de dilatation volumique du liquide

$\tilde{o}_l$ : viscosité cinématique du liquide

Les propriétés physiques sont évaluées à la température dite de film :

$$T_f = \frac{T_p + T_{sat}}{2} \tag{III.15}$$

**III.4. Bilan thermique de la chaudière/calcul des températures des gaz de fumées:**

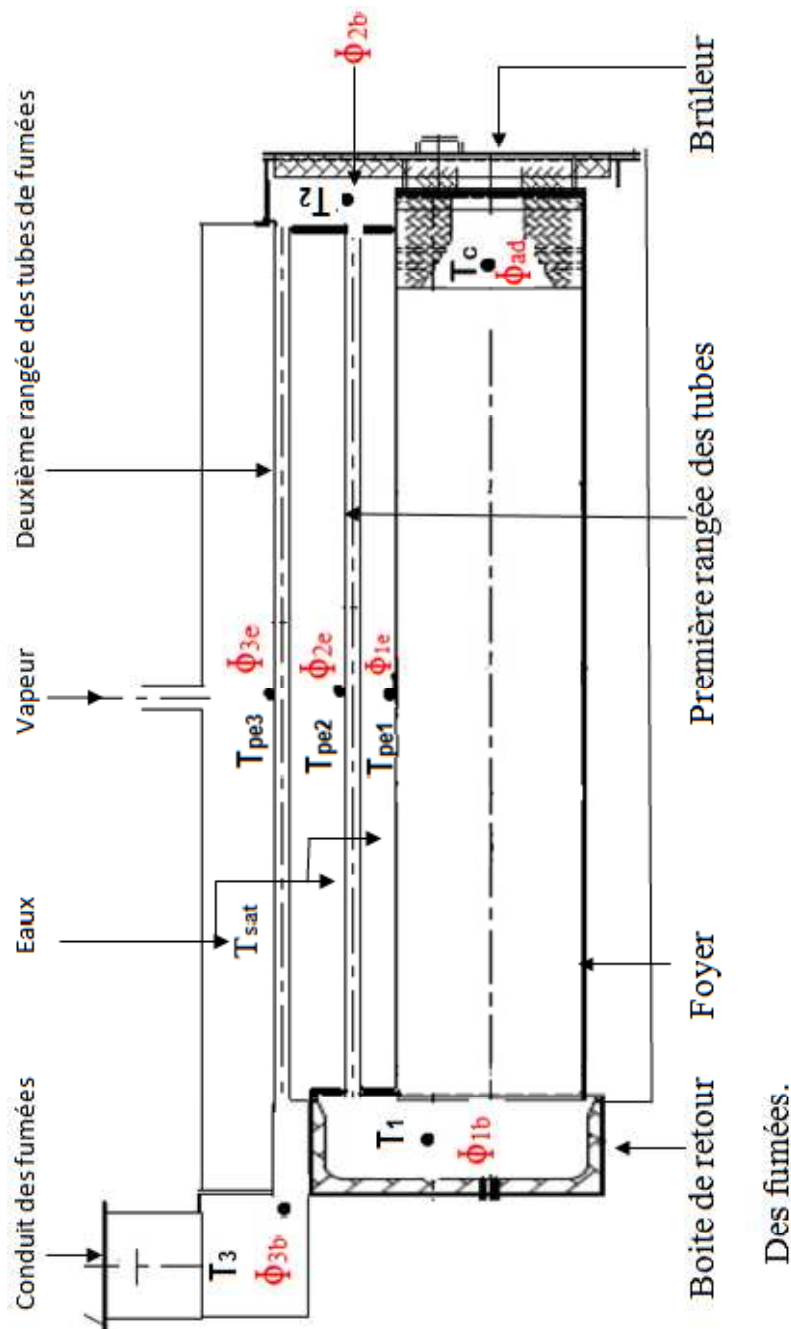


Figure III.10. Schéma définissant la disposition des flux et des températures dans la chaudière.

A l'aide du langage de programmation Matlab, nous allons procéder au calcul du bilan thermique de la chaudière en suivant l'organigramme suivant :

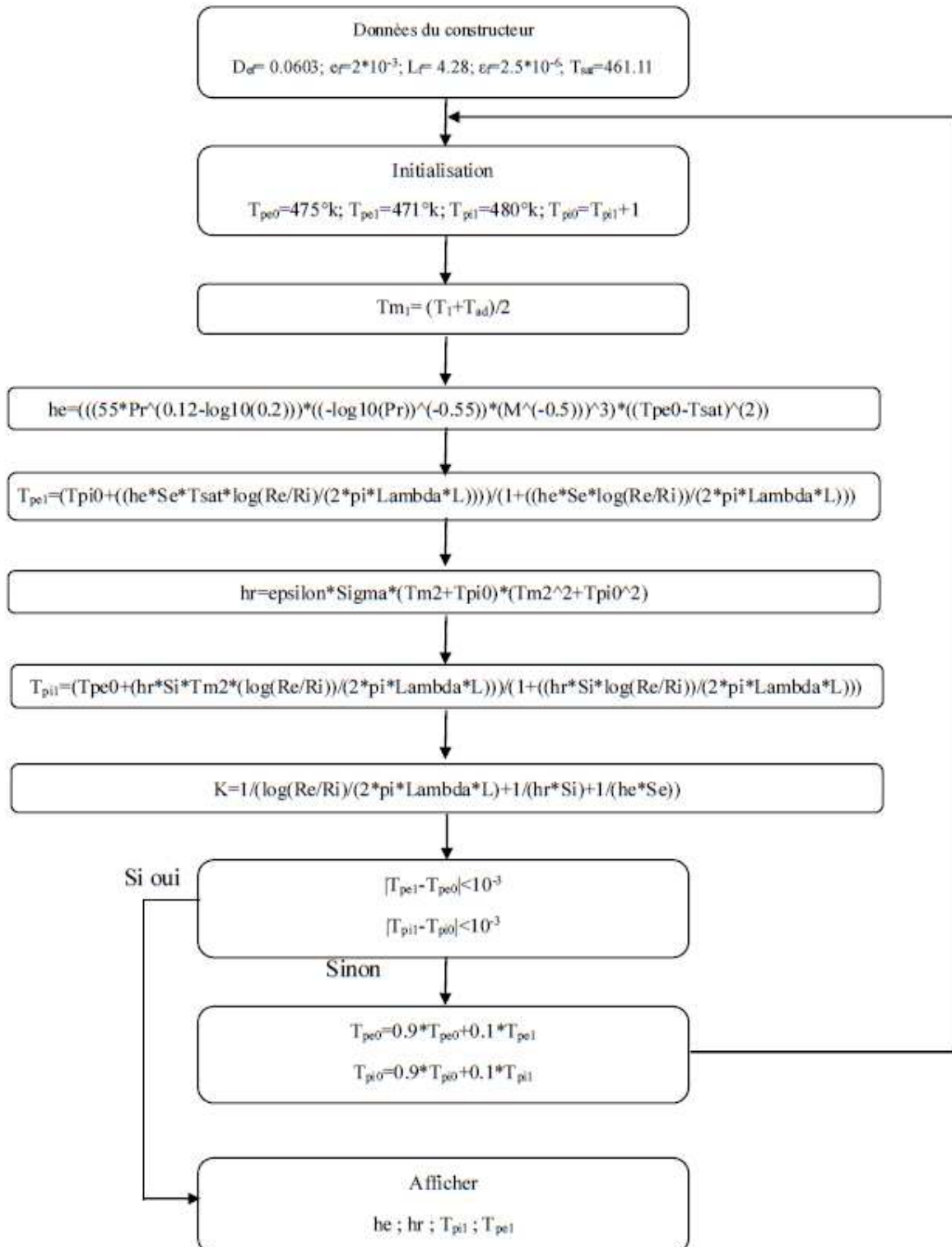


Figure III.11 : Organigramme suivi lors du calcul du bilan thermique de la chaudière

### III.4.1. Calcul de la température $T_1$ dans la boîte de retour en régime permanent :

On admet un échange radiatif dans le foyer régi par l'équation suivante : [7]

$$\Phi_1 = h_{r1} \cdot S_{i1} \cdot (T_{m1} - T_{pi}) \quad (\text{III.16})$$

où:

$\Phi_1$  : flux radiatif échangé du foyer vers la paroi intérieure du foyer.

$h_{r1}$ : le coefficient d'échange radiatif sachant que :

$$h_{r1} = \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot (T_{m1} + T_{pi}) \cdot (T_{m1}^2 + T_{pi}^2) \quad [7] \quad (\text{III.17})$$

$\varepsilon_1$  : Émissivité des gaz de combustion, à la température  $T_{ad}$ , dans le foyer qui vaut 0.24 ; voir figures (III.2) et (III.3).

$S_{i1}$  : Surface d'échange intérieure du foyer vaut 9.60 m<sup>2</sup>.

$T_{m1}$  : température moyenne dans le foyer soit :  $T_{m1} = \frac{T_{ad} + T_1}{2}$

$T_{pi}$  : température moyenne de la paroi intérieure du foyer.

Un échange conductif entre la paroi intérieure et extérieure du foyer évaluée par: [7]

$$\Phi_2 = \frac{(T_{pi1} - T_{pe1}) 2\pi \lambda L}{\ln \frac{R_{e1}}{R_{i1}}} \quad (\text{III.18})$$

$\Phi_2$  : Flux conductif échangé entre les parois du foyer.

$T_{pe1}$  : température moyenne de la paroi extérieure du foyer.

Et enfin échange par convection entre la paroi extérieure du foyer et l'eau : [7]

$$\Phi_3 = h_{e1} \cdot S_{e1} \cdot (T_{pe1} - T_{sat}) \quad (\text{III.19})$$

$\Phi_3$  : Flux convectif échangé entre la paroi extérieure et l'eau.

$S_{e1}$  : Surface extérieure du foyer vaut 10.08m<sup>2</sup>.

Le coefficient d'échange convectif entre le foyer extérieur et l'eau est déterminé à partir de la corrélation de COOPER : [9]

$$h_{e1} = 55 \cdot P_R^{0.12 - \ln \varepsilon_{p1}} (-\ln P_R)^{-0.55} M^{-0.5} (T_{pe1} - T_{sat})^{2/3} \quad (III.20)$$

$$P_R = \frac{P}{P_{sat}} = \frac{12}{222.2} = 0.054 \quad (III.21)$$

$\varepsilon_{p1}$  : Rugosité de la paroi du foyer ;  $\varepsilon_{p1} = 0.25 \text{ m}$ .

$P_R$  : Pression réduite de l'eau.

$P$  : Pression de l'eau à l'intérieur de la chaudière.

$P_{sat}$  : Pression de critique de l'eau.

- L'égalité des flux entre :  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  et  $\Phi_3$  nous donne ce système de trois équations :

$$h_{r1} \cdot S_{i1} \cdot (T_{m1} - T_{pi}) = \frac{(T_{pi1} - T_{pe1}) 2\pi \lambda L}{\ln \frac{R_{e1}}{R_{i1}}} \quad (III.22)$$

$$\frac{(T_{pi1} - T_{pe1}) 2\pi \lambda L}{\ln \frac{R_{e1}}{R_{i1}}} = h_{e1} \cdot S_{e1} \cdot (T_{pe1} - T_{sat}) \quad (III.23)$$

$$h_{r1} \cdot S_{i1} \cdot (T_{m1} - T_{pi}) = h_{e1} \cdot S_{e1} \cdot (T_{pe1} - T_{sat}) \quad (III.24)$$

- Ce qui nous permettra d'extraire les équations pour calculer :  $T_{m1}$ ,  $T_{pi}$ ,  $T_{pe1}$  et  $h_{e1}$  en ayant recours au langage de programmation MATLAB :

$$T_{m1} = \left( T_{pi1}^4 + \frac{h_{e1} \cdot S_{e1} \cdot (T_{pe1} - T_{sat})}{\varepsilon \cdot \sigma_1 \cdot S_{i1}} \right)^{0.25} \quad (III.25)$$

$$T_{pi1} = \frac{T_{pe1} + \frac{h_r \cdot S_{i1} \cdot T_{m1} \cdot \ln \frac{R_{e1}}{R_{i1}}}{2\pi\lambda L}}{1 + \frac{h_r \cdot S_{i1} \cdot \ln \frac{R_{e1}}{R_{i1}}}{2\pi\lambda L}} \quad (\text{III.26})$$

$$T_{pe1} = T_{pi1} + \frac{h_e \cdot S_{e1} \cdot T_{sat} \cdot \ln \frac{R_{e1}}{R_{i1}}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L} \quad (\text{III.27})$$

$$h_{e1} = 55 P_R^{0.12 - \ln \varepsilon_{p1}} (-\ln P_R)^{-0.55} M^{-0.5} (T_{pe1} - T_{sat})^{2/3} \quad (\text{III.28})$$

$$h_{r1} = \varepsilon_1 \cdot \sigma_1 \cdot (T_{m1} + T_{pi1}) \cdot (T_{m1}^2 + T_{pi1}^2) \quad (\text{III.29})$$

Pour  $\varepsilon_1=0.245$  et  $\varepsilon_{p1}=0.25$  on a :

$$T_{m1}=1168.1\text{K.}$$

$T_{ad}$  : Température adiabatique dans le foyer.

Pour un excès d'air de  $\alpha = 1.10$ , on a  $T_c = 1373\text{k}$  donc d'après la définition de la température  $T_{m1}$  la température des fumées dans la boîte de retour est  $T_1=963.2\text{K}$  soit  $690.2^\circ\text{c}$ .

L'écart de température entre la paroi extérieure du foyer et l'eau est de  $20.37\text{K}$ . On peut dire qu'on est dans la phase d'ébullition nucléée.

**III.4.2 calcul de la température  $T_2$  du deuxième parcours:**

On admet un échange radiatif dans le foyer régi par l'équation suivante :

$$\Phi_1 = h_{r2} \cdot S_{i2} \cdot (T_{m2} - T_{pi2}) \quad (\text{III.30})$$

où:

$\Phi_1$  : Flux radiatif échangé du foyer vers la paroi intérieure du foyer.

$h_{r2}$ : Le coefficient d'échange radiatif sachant que :

$$h_{r2} = \varepsilon_2 \cdot \sigma_2 \cdot (T_{m2} + T_{pi2}) \cdot (T_{m2}^2 + T_{pi2}^2) \quad (\text{III.31})$$

$\varepsilon_2$  : Émissivité des gaz de combustion dans les tubes qui vaut 0.27 ; voir figures (III.2) et (III.3).

$S_{i2}$  : Surface d'échange intérieure des tubes vaut 43.48 m<sup>2</sup>.

$T_{m2}$  : Température moyenne dans les tubes soit :  $T_{m2} = \frac{T_1 + T_2}{2}$  .

$T_{pi2}$  : Température moyenne de la paroi intérieure des tubes.

Un échange conductif entre la paroi intérieure et extérieure des tubes évalué par: [7]

$$\Phi_2 = \frac{(T_{pi2} - T_{pe2}) 2\pi \lambda L}{\ln \frac{R_{e2}}{R_{i2}}} \quad (\text{III.32})$$

$\Phi_2$  : Flux conductif échangé entre les parois des tubes.

$T_{pe2}$  : température moyenne de la paroi extérieure des tubes.

Et enfin échange par convection entre la paroi extérieure des tubes et l'eau :

$$\Phi_3 = h_{e2} \cdot S_{e2} \cdot (T_{pe2} - T_{sat}) \quad (\text{III.33})$$

$\Phi_3$  : Flux convectif échangé entre la paroi extérieure et l'eau.

$S_{e2}$  : Surface extérieure des soixante tubes de fumées (parcours2) vaut 48.647m<sup>2</sup>.

Le coefficient d'échange convectif entre les parois extérieures des tubes et l'eau est déterminé à partir de la corrélation de COOPER :

$$h_{e2} = 55 \cdot P_R^{0.12 - \ln \varepsilon_{p2}} (-\ln P_R)^{-0.55} M^{-0.5} (T_{pe2} - T_{sat})^{2/3} \quad (III.34)$$

$\varepsilon_{p2}$  : Rugosité de la paroi des tubes ;  $\varepsilon_{p2}=0.25\text{m}$ .

$P_R$  : Pression réduite de l'eau.

-L'égalité des flux entre :  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  et  $\Phi_3$  nous donne ce système de trois équations :

$$h_{r2} \cdot S_{i2} \cdot (T_{m2} - T_{pi2}) = \frac{(T_{pi2} - T_{pe2}) 2\pi \lambda L}{\ln \frac{R_{e2}}{R_{i2}}} \quad (III.35)$$

$$\frac{(T_{pi2} - T_{pe2}) 2\pi \lambda L}{\ln \frac{R_{e2}}{R_{i2}}} = h_{e2} \cdot S_{e2} \cdot (T_{pe2} - T_{sat}) \quad (III.36)$$

$$h_{r2} \cdot S_{i2} \cdot (T_{m2} - T_{pi2}) = h_{e2} \cdot S_{e2} \cdot (T_{pe2} - T_{sat}) \quad (III.37)$$

Ce qui nous permettra d'extraire les équations pour calculer :  $T_{m2}$ ,  $T_{pi2}$ ,  $T_{pe2}$  et  $h_{e2}$  en ayant recours au langage de programmation MATLAB :

$$T_{m2} = \left( T_{pi2}^4 + \frac{h_{e2} \cdot S_{e2} \cdot (T_{pe2} - T_{sat})}{\varepsilon_2 \cdot \sigma_2 \cdot S_{i2}} \right)^{0.25} \quad (III.38)$$

$$T_{pi2} = \frac{T_{pe2} + \frac{h_{r2} \cdot S_{i2} \cdot T_{m2} \cdot \ln \frac{R_{e2}}{R_{i2}}}{2\pi \lambda L}}{1 + \frac{h_{r2} \cdot S_{i2} \cdot \ln \frac{R_{e2}}{R_{i2}}}{2\pi \lambda L}} \quad (III.39)$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_{sat} - T}{L} \tag{III.40}$$

$$\tag{III.41}$$

$$\tag{III.42}$$

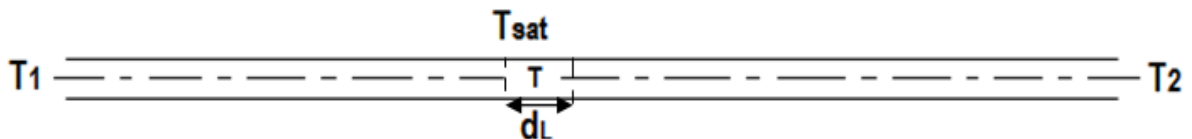
Au niveau de ce parcours, on suivra toujours la même méthode que précédemment et on supposera que la distribution de la température est linéaire le long des tubes. Par ailleurs on a :

$$\tag{III.43}$$

: Débit des fumées qui vaut 0.0311 Kg/s.

: Chaleur spécifique des fumées qui est évaluée à la température .

$D_{e3}$  : diamètre extérieur des tubes qui vaut 0.0602 m.



**Figure III.12 : Schématisation de la distribution de chaleur dans un tube du troisième parcours.**

En intégrant et en développant l'équation précédente, comprise entre la température d'entrée des fumées  $T_1$  et la température de sortie des fumées  $T_2$ , on obtient :

$$\tag{III.44}$$

D'après l'égalité des flux :  $\phi = \sum_i \phi_i$  avec un coefficient d'échange global par unité de surface :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_{e2} \cdot S_{e2}} + \frac{2 \cdot \delta \cdot \epsilon \cdot L}{\ln \frac{R_{e2}}{R_{i2}}} + \frac{1}{h_{r2} S_{i2}}} \quad (III.45)$$

Pour  $\epsilon_2=0.27$  et  $\epsilon_{p2}=0.25$  on a :

$$T_{m2}=600.06K.$$

Pour un excès d'air de  $\alpha=1.10$ , on a  $T_1=963.2K$  donc d'après la définition de la température  $T_{m2}$  la température des fumées dans le deuxième parcours est de  $T_2=510.13$  soit  $T_2=237.13^\circ C$ .

L'écart de température entre la paroi extérieure des tubes et l'eau est de 10K. On peut dire qu'on est dans la phase d'ébullition nucléée.

### III.4.3 bilan au niveau du troisième parcours :

L'échange présent dans les tubes de fumées est toujours :

- Rayonnement de la paroi intérieure vers l'eau.

$$\Phi_1 = h_r \cdot S_{i3} \cdot (T_{m3} - T_{pi3}) \quad (III.46)$$

- Conduction entre parois intérieures et extérieures du tube.

$$\Phi_2 = \frac{(T_{pi3} - T_{pe3}) 2\pi \lambda L}{\ln \frac{R_{e3}}{R_{i3}}} \quad (III.47)$$

- Convection entre paroi intérieure et l'eau bouillante.

$$\Phi_3 = h_{e3} \cdot S_{e3} \cdot (T_{pe3} - T_{sat}) \quad (III.48)$$

Au niveau de ce parcours, on suivra toujours la même méthode que dans le premier et deuxième. On supposera aussi que la distribution de la température est linéaire le long des tubes.

La rugosité des parois des tubes de ce parcours est la même avec celle du deuxième; par ailleurs on a :

$$(III.49)$$

: Débit des fumées qui vaut 0.0311 Kg/s.

: Chaleur spécifique des fumées qui est évaluée à la température qui  $T_2$  vaut 4.2236 (KJ/Kg.K).

$D_{e3}$  : diamètre extérieur des tubes qui vaut 0.0602 m.

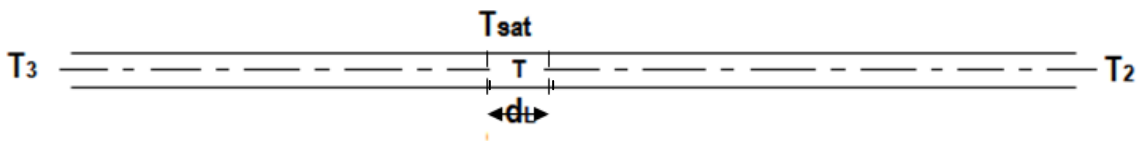


Figure III.13 : Schématisation de la distribution de chaleur dans un tube du troisième parcours.

En intégrant et en développant l'équation précédente, comprise entre la température d'entrée des fumées  $T_2$  et la température de sortie des fumées  $T_3$ , on obtient :

$$\text{-----} \quad (III.50)$$

D'après l'égalité des flux : avec un coefficient d'échange global par unité de surface :

$$\text{-----} \quad (III.51)$$

Nous obtenons pour, respectivement, une rugosité de la paroi et émissivité des gaz : =0.25 et :

$$577.81K.$$

Pour un excès d'air de  $\alpha = 1.10$ , on a  $T_2 = 510.13K$  donc d'après la définition de la température  $T_{m3} = 577.81K$  la température des fumées dans le troisième parcours est de  $T_3 = 465.63K$  soit  $T_2 = 192.63^\circ C$ .

L'écart de température entre la paroi extérieure des tubes et l'eau est de  $9.50K$ . On peut dire qu'on est dans la phase d'ébullition nucléée.

### **III.5. Conclusion :**

Ce chapitre nous a permis d'aboutir sur certaines remarques :

- La température de combustion diminue quand le coefficient d'excès d'air augmente parce que l'air entre à la température ambiante.
- L'émissivité varie inversement proportionnellement avec la température des fumées.
- La rugosité de la paroi influence par contre proportionnellement sur la température autrement dit : la température s'élève avec l'élévation de la rugosité de la paroi.

## CONCLUSION GENERALE

---

S'il existe bien une énergie qui est très demandée ces dernières années, c'est bien 'la vapeur' qu'elle soit saturée ou surchauffée selon son domaine d'utilisation. La chaudière à vapeur est le moyen de production de vapeur pour de grands débits. Dans notre cas, la chaudière est de type tubes de fumées à trois parcours de tubes de fumées.

Principalement, l'objectif est de trouver les températures des fumées dans chaque parcours. Etant donné, que les tubes sont immergés dans l'eau, la chaleur est transférée des tubes vers l'eau qui cette dernière bout et se transforme en vapeur pour enfin sortir d'un clapet de sortie de vapeur. Les différents modes de chaleur sont enregistrés y compris le rayonnement et le changement de phase car il existe des différences de températures très importantes entre l'eau et les parois des tubes des fumées considérées comme « semi-transparentes ». Pour cela on a procédé à l'utilisation du langage de programmation MATLAB en utilisant d'abord les équations chimiques de combustion pour l'état adiabatique dans le foyer. L'égalité des flux échangés entre le foyer, les tubes de fumées et l'eau, et la corrélation de COOPER nous ont aidé à déterminer le coefficient d'échange convectif de l'eau  $h_e$ , le coefficient d'échange radiatif  $h_r$ . Au final, c'est traduit par les résultats suivants :

- $\Delta T_{sat} = 10K < T_{pext} - T_{sat} < 35K$  selon la courbe de Nukiyama on est dans la phase d'ébullition nucléée sur tous les parcours des fumées de la chaudière.
- Température de combustion adiabatique  $T_{ad} = 1373K$ .
- Température des fumées dans la boîte de retour  $T_1 = 963.2K$ .
- Température de sortie des fumées du deuxième parcours  $T_2 = 510.13K$ .
- Température de sortie des fumées de la cheminée  $T_3 = 465.13K$ .

Pour finir, nous estimons que, comme tout travail de recherche, nous sommes ainsi conscients du caractère perfectible de notre étude. De ce fait, certains facteurs, dont il est important de tenir compte, constituent une limite à la validité de l'exploitation possible des résultats.

La durée de stage que la faculté a attribué n'a pas été pleinement exploité et suffisante. Par manque de documentation lié à la combustion en général et à l'étude thermique de ce genre de chaudière en particulier. L'accès à quelques ouvrages n'a pas été facile.

En outre, nous avons eu beaucoup de difficultés pour établir un bilan thermique et avoir des écarts de température et des coefficients d'échange de chaleur assez logiques à ce niveau de température.

## CONCLUSION GENERALE

---

A l'issue de notre étude, nous estimons que ce modeste travail soit le prélude à d'autres recherches dans le domaine des chaudières à vapeur à tubes de fumées vue le peu de recherches menées sur ce type de chaudière.

## *Références bibliographiques*

[1] : A. LABASSI

Cours du module Tec 376 (C.C.V)

Département du Génie Mécanique option Energétique Université de Tizi-Ouzou,1993.

[2] : BOSCH thermo technologie SAS

[3] : Alain RIOU et Jean Pierre DEPAUW

Différents types de chaudières industrielles

Techniques de l'ingénieur B1 480. 10/02/1990

[4] : Marie –Noëlle Dumont

Simulation et aide au dimensionnement des chaudières de récupération

Travail présenté pour l'obtention du grade de doctoresse en sciences de l'ingénieur.

Département de chimie appliquée Université de Liège 2009

[5] : Direction SONELGAZ d' ALGER.

[6] : AKERMA-M et MAYOUF-KH

Etude thermique d'un générateur de vapeur Thèse d'ingénieur en Génie Mécanique option Energétique Université de Tizi-Ouzou,2003.

[7] : Initiation au transfert thermique

JEAN FRANCOIS SACADURA

[8] : Cours A.HAMDAD

Cours de Transfert de Chaleur avec Changement de Phase

Département du Génie Mécanique Option Energétique Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013

[9] : MONIQUE LALLEMAND.

Transferts en changement de phase-ébullition libre-Génie énergétique.

Techniques de l'ingénieur BE 8 235.

[10] : ROBERTA VISENTINI

Eude expérimentale des transferts thermiques en ébullition transitoire

Thèse de doctorat université de Toulouse 2012.

[11] AKERMA.M

Etude des échanges convectifs autour d'un cylindre horizontal

Thèse de Master en Génie Mécanique option Energétique

Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou,2013

Pression absolue	Température	Volume massique vapeur	Masse volumique (Densité)		Enthalpie spécifique eau liquide (Chaleur sensible)			Enthalpie spécifique vapeur (chaleur totale)			Chaleur latente de vaporisation			Chaleur spécifique (Heat capacity)		Conductivité thermique vapeur saturée	Viscosité dynamique de l'eau	Viscosité dynamique de la vapeur	Viscosité cinématique vapeur
			Vapeur	Eau condensée	kJ/kg	W/kg	kcal/kg	kJ/kg	W/kg	kcal/kg	kJ/kg	W/kg	kcal/kg	Vapeur	Eau				
0.01	164.96	0.2727	3.667	902.37	897.06	183.63	186.48	2761.98	767.22	859.89	2064.92	873.69	483.20	2.4428	4.3541	0.0330	0.000184	0.000018	3.97
0.02	167.76	0.2854	3.918	898.87	709.30	197.03	189.41	2764.84	768.01	860.37	2068.83	870.98	480.99	2.4691	4.3633	0.0334	0.000181	0.000018	3.74
0.03	170.42	0.2403	4.162	896.86	720.94	200.26	172.19	2767.46	768.74	861.00	2046.83	868.48	488.80	2.4951	4.3724	0.0338	0.000188	0.000018	3.54
0.04	172.94	0.2268	4.409	894.28	732.03	203.34	174.84	2769.89	769.41	861.58	2037.86	866.07	486.73	2.5206	4.3812	0.0342	0.000186	0.000018	3.36
0.05	175.36	0.2148	4.655	891.78	742.64	206.29	177.38	2772.13	770.04	862.11	2029.49	863.78	484.74	2.5457	4.3900	0.0346	0.000184	0.000018	3.20
0.06	177.67	0.2040	4.901	889.37	752.82	209.12	179.91	2774.22	770.62	862.61	2021.40	861.50	482.88	2.5703	4.3986	0.0350	0.000181	0.000018	3.06
0.07	179.88	0.1943	5.147	887.02	762.50	211.85	182.14	2776.16	771.16	863.07	2013.56	859.32	480.93	2.5944	4.4070	0.0354	0.000189	0.000018	2.93
0.08	181.98	0.1852	5.393	884.74	771.11	214.48	184.17	2777.96	771.66	863.49	1998.88	857.15	477.98	2.6181	4.4158	0.0358	0.000186	0.000018	2.70
0.09	183.98	0.1763	5.639	882.52	779.42	217.00	186.00	2779.66	772.13	863.88	1984.84	855.01	475.00	2.6415	4.4239	0.0361	0.000184	0.000018	2.57
0.10	185.88	0.1674	5.885	880.35	787.48	219.42	187.76	2781.27	772.58	864.24	1971.31	852.89	472.00	2.6647	4.4324	0.0364	0.000183	0.000018	2.44
0.12	191.60	0.1511	6.617	874.28	814.66	226.30	194.88	2788.42	775.73	866.29	1970.73	847.43	470.70	2.7328	4.4566	0.0378	0.000180	0.000018	2.34
0.14	196.04	0.1407	7.106	870.38	830.05	230.87	198.29	2787.79	774.39	866.88	1967.73	843.81	467.80	2.7767	4.4724	0.0381	0.000187	0.000018	2.20
0.16	198.28	0.1317	7.896	866.67	844.64	234.82	201.74	2789.88	774.97	866.38	1948.24	840.34	464.61	2.8196	4.4878	0.0388	0.000185	0.000018	2.07
0.18	201.37	0.1237	8.085	863.00	858.54	238.48	205.06	2791.73	775.48	866.79	1933.19	837.00	461.74	2.8620	4.5037	0.0394	0.000183	0.000018	1.96
0.20	204.30	0.1166	8.575	859.64	871.92	242.17	208.23	2793.37	775.94	867.18	1921.55	833.76	458.95	2.9036	4.5191	0.0400	0.000181	0.000018	1.86
0.22	207.11	0.1103	9.065	856.30	884.58	245.71	211.27	2794.81	776.34	867.53	1910.37	830.53	456.26	2.9444	4.5342	0.0405	0.000189	0.000018	1.77
0.24	209.79	0.1047	9.555	853.08	896.78	249.10	214.19	2796.09	776.69	867.83	1899.31	827.59	453.64	2.9849	4.5497	0.0411	0.000187	0.000018	1.69
0.26	212.37	0.0995	10.044	849.91	908.56	252.35	217.01	2797.24	777.00	868.10	1888.85	824.82	451.19	3.0248	4.5648	0.0417	0.000185	0.000018	1.61
0.28	214.86	0.0949	10.538	846.88	919.93	255.44	219.72	2798.18	777.27	868.33	1878.85	821.74	448.81	3.0643	4.5800	0.0422	0.000184	0.000018	1.56
0.30	217.24	0.0906	11.032	843.88	930.92	258.49	222.38	2798.99	777.51	868.54	1868.11	818.92	446.19	3.1034	4.5950	0.0427	0.000183	0.000018	1.49
0.32	219.55	0.0866	11.528	840.94	941.67	261.48	224.99	2799.77	777.71	868.71	1858.20	816.17	443.82	3.1421	4.6101	0.0433	0.000182	0.000018	1.43
0.34	221.78	0.0832	12.020	838.09	951.90	264.42	227.36	2799.99	777.89	868.86	1848.49	813.47	441.60	3.1804	4.6250	0.0438	0.000180	0.000017	1.38
0.36	223.94	0.0799	12.519	835.31	961.93	267.20	229.75	2800.59	778.03	868.99	1838.98	810.83	439.23	3.2187	4.6402	0.0443	0.000189	0.000017	1.33
0.38	226.03	0.0769	13.012	832.67	971.69	269.91	232.00	2801.33	778.15	869.09	1829.66	808.24	437.01	3.2566	4.6551	0.0448	0.000188	0.000017	1.28
0.40	228.07	0.0740	13.509	829.90	981.19	272.55	234.15	2802.11	778.25	869.17	1820.50	805.69	434.82	3.2944	4.6703	0.0453	0.000187	0.000017	1.24
0.42	230.04	0.0714	14.008	827.27	990.48	275.11	236.21	2802.96	778.32	869.24	1811.50	803.20	432.67	3.3319	4.6853	0.0458	0.000185	0.000017	1.20
0.44	231.96	0.0689	14.508	824.88	999.50	277.41	238.19	2803.87	778.38	869.29	1802.83	800.74	430.58	3.3694	4.7003	0.0462	0.000184	0.000017	1.17
0.46	233.84	0.0666	15.009	822.18	1008.33	280.11	240.14	2804.82	778.41	869.31	1793.34	798.32	428.48	3.4069	4.7156	0.0467	0.000183	0.000017	1.13
0.48	235.68	0.0644	15.512	819.66	1016.97	282.49	242.07	2805.83	778.42	869.30	1784.36	795.93	426.43	3.4442	4.7308	0.0472	0.000182	0.000017	1.10
0.50	237.44	0.0624	16.018	817.19	1025.41	284.71	243.94	2806.92	778.42	869.32	1775.90	793.58	424.41	3.4816	4.7461	0.0477	0.000182	0.000017	1.07
0.52	239.18	0.0608	16.521	814.77	1033.69	286.73	245.79	2808.25	778.40	869.31	1768.56	791.27	422.41	3.5187	4.7614	0.0481	0.000181	0.000017	1.04
0.54	240.88	0.0587	17.028	812.38	1041.71	288.59	247.63	2809.72	778.37	869.28	1760.33	788.96	420.45	3.5560	4.7767	0.0486	0.000180	0.000017	1.01
0.56	242.54	0.0570	17.536	810.02	1049.41	290.16	249.44	2811.33	778.32	869.23	1752.20	786.72	418.61	3.5931	4.7919	0.0491	0.000189	0.000017	0.99
0.58	244.16	0.0554	18.048	807.70	1057.11	291.74	251.25	2813.07	778.26	869.16	1744.17	784.48	416.88	3.6306	4.8076	0.0495	0.000188	0.000017	0.96
0.60	245.75	0.0539	18.567	805.40	1064.41	293.29	253.02	2814.94	778.19	869.11	1736.24	782.29	414.69	3.6679	4.8233	0.0500	0.000188	0.000017	0.94
0.62	247.31	0.0524	19.070	803.14	1071.21	294.85	254.78	2816.92	778.09	869.04	1728.39	780.11	412.53	3.7053	4.8386	0.0504	0.000187	0.000017	0.92
0.64	248.84	0.0511	19.555	801.01	1077.61	296.34	256.54	2819.00	777.99	868.95	1720.62	777.98	410.38	3.7430	4.8545	0.0509	0.000186	0.000018	0.90
0.66	250.33	0.0497	20.111	799.01	1083.61	297.77	258.29	2821.24	777.87	868.85	1712.94	775.82	408.13	3.7807	4.8703	0.0513	0.000186	0.000018	0.88
0.68	251.80	0.0485	20.648	797.18	1089.34	299.14	260.04	2823.64	777.76	868.74	1705.33	773.70	407.81	3.8188	4.8862	0.0517	0.000185	0.000018	0.86
0.70	253.24	0.0473	21.136	795.41	1101.61	300.00	261.72	2826.19	777.61	868.62	1697.79	771.61	405.61	3.8563	4.9020	0.0522	0.000184	0.000018	0.84
0.72	254.66	0.0462	21.660	793.18	1108.59	301.83	263.37	2828.87	777.46	868.50	1690.32	769.53	403.79	3.8944	4.9183	0.0526	0.000184	0.000018	0.82
0.74	256.05	0.0451	22.183	791.08	1115.39	303.83	265.41	2831.67	777.31	868.38	1682.91	767.48	401.96	3.9330	4.9345	0.0531	0.000183	0.000018	0.80
0.76	257.41	0.0440	22.708	789.95	1122.13	311.70	268.02	2834.57	777.14	868.22	1675.87	765.44	400.20	3.9718	4.9508	0.0535	0.000183	0.000018	0.78
0.78	258.78	0.0430	23.235	788.87	1128.78	313.55	269.60	2837.57	776.96	868.07	1668.29	763.41	398.48	4.0103	4.9672	0.0539	0.000182	0.000018	0.77

Vapeur saturée					Eau	
P abs. bars	Temp. vapo- risa- tion °C	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	enthalpie massique Vaporisa- tion kJ/kg	enthalpie massique Vapeur kJ/kg	Chal. Mas. kJ/kg/°C	enthalpie massique Eau liquide kJ/kg
0.1	45,83	0,0682	2392,9	2584,8	4,1857	191,83
0.2	60,09	0,1307	2358,4	2609,9	4,1846	251,45
0.3	69,12	0,1912	2336,1	2625,4	4,1855	289,3
0.4	75,88	0,2504	2319,2	2636,9	4,1862	317,65
0.5	81,34	0,3086	2305,4	2646	4,1869	340,56
0.6	85,95	0,366	2293,6	2653,6	4,1877	359,93
0.7	89,96	0,4228	2283,3	2660,1	4,1882	376,77
0.8	93,51	0,4792	2274	2665,8	4,1891	391,72
0.9	96,71	0,535	2265,6	2670,9	4,1899	405,21
1	99,63	0,5903	2257,9	2675,4	4,1906	417,51
1,0133	100	0,5977	2256,9	2676	4,1906	419,06
1.2	104,81	0,7003	2244,1	2683,4	4,192	439,36
1.3	107,13	0,7547	2237,8	2687	4,1929	449,19
1.6	113,32	0,9166	2220,9	2696,2	4,195	475,38
1.8	116,93	1,0233	2210,8	2701,5	4,1965	490,7
2	120,23	1,1294	2201,6	2706,3	4,1978	504,7
2.5	127,43	1,392	2181	2716,4	4,2011	535,34
3	133,54	1,6513	2163,2	2724,7	4,2042	561,43
3.6	139,86	1,9596	2144,4	2732,9	4,208	588,53
4	143,62	2,1636	2133	2737,6	4,2102	604,67
4.5	147,92	2,4201	2119,7	2742,9	4,2128	623,16
5	151,84	2,6688	2107,4	2747,5	4,2158	640,12
5.5	155,46	2,9197	2095,9	2751,7	4,2183	655,78

6	158.84	3.1696	2085	2755.5	4.2207	670.42
6.5	161.99	3.4188	2074.7	2758.8	4.2232	684.12
7	164.96	3.667	2064.9	2762	4.2256	697.06
7.5	167.75	3.9185	2055.5	2764.8	4.2283	709.29
8	170.41	4.1615	2046.5	2767.5	4.2306	720.94
8.5	172.94	4.4092	2037.9	2769.9	4.2328	732.02
9	175.36	4.6555	2029.5	2772.1	4.2349	742.64
9.5	177.66	4.902	2020.9	2775	4.2374	752.81
10	179.88	5.1467	2013.6	2776.2	4.2395	762.61
11	184.07	5.637	1998.5	2779.7	4.2437	781.13
12	187.96	6.1275	1984.3	2782.7	4.2479	798.43
13	191.61	6.6181	1970.7	2785.4	4.2519	814.7
14	195.04	7.1073	1957.7	2787.8	4.2559	830.08
15	198.29	7.593	1945.2	2789.9	4.2598	844.67
16	201.37	8.0841	1933.2	2791.7	4.2636	858.56
17	204.31	8.5763	1921.5	2793.4	4.2672	871.84
18	207.11	9.0662	1910.3	2794.8	4.2711	884.58
19	209.8	9.5511	1899.3	2796.1	4.2746	896.81
20	212.37	10.0503	1888.6	2797.2	4.2783	908.59
22	217.24	11.0314	1868.1	2799.1	4.2854	930.95
24	221.78	12.0192	1848.5	2800.4	4.2922	951.93
26	226.04	13.0107	1829.6	2801.4	4.2989	971.72
28	230.05	14.0076	1811.5	2802	4.3055	990.48
34	240.88	17.0271	1760.3	2802.1	4.325	1041.80
38	247.31	19.0694	1728.4	2801.1	4.3375	1072.70
42	253.24	21.1372	1697.8	2799.4	4.35	1101.60
46	258.75	23.2342	1668.3	2797	4.3625	1128.80
50	263.91	25.3614	1639.7	2794.20	4.3746	1154.50

## **Volume des gaz, mètre cube normal :**

A moins de 273°C le volume  $V$  d'un gaz = 0.

Si l'on chauffe le gaz il se dilate pour chaque degré d'élévation de température de  $1/273$  (=0.00367) du volume ( $V$ ) qu'il occupe à l'état sec à 0°C et sous une pression de bar. 1 mètre cube de gaz sous cet état est appelé *mètre cube normal* ( $Nm^3$ ).

Si on chauffe un gaz occupant  $V Nm^3$  à  $t^\circ C$ , on obtient

$$V_t = V. (1 + 0.00367. t) \dots m^3$$

pour d'autres pressions atmosphériques (états barométriques), par exemple à une hauteur de  $Z=600m$  (voir ci-dessus), il se transforme en

$$V'_t = V_t \cdot \frac{760}{708} \dots m^3$$

Calcul thermique des chaudières ;

FRIEDRICH NUBER et KARL NUBER,

DUNOD, Paris 1972

Table D.1. *Thermophysical properties of air*

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (kJ/kg-K)	$\mu \times 10^7$ (N-s/m <sup>2</sup> )	$\nu \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \times 10^3$ (W/m-K)	$\alpha \times 10^4$ (m <sup>2</sup> /s)	$Pr$
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.43	13.80	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.59	18.10	10.30	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.30	15.89	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.30	22.49	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.00	29.88	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.42	33.80	38.27	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.30	47.20	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.70	56.74	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.90	66.69	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.90	76.89	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.70	87.29	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.40	97.98	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.38	54.90	108.79	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.94	57.30	119.76	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.81	59.60	131.07	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.91	62.00	142.97	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.20	64.30	155.09	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.89	66.70	167.89	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.84	71.50	194.88	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	163.00	76.30	223.77	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.16	82.00	257.45	0.719
1400	0.2488	1.207	530.0	213.06	91.00	303.08	0.703
1500	0.2322	1.230	557.0	239.90	100.00	350.16	0.685
1600	0.2177	1.248	584.0	268.29	106.00	390.20	0.688
1700	0.2049	1.267	611.0	298.23	113.00	435.32	0.685
1800	0.1935	1.286	637.0	329.20	120.00	482.24	0.683
1900	0.1833	1.307	663.0	361.67	128.00	534.23	0.677
2000	0.1741	1.337	689.0	395.69	137.00	588.47	0.672
2100	0.1658	1.372	715.0	431.22	147.00	646.18	0.667
2200	0.1582	1.417	740.0	467.68	160.00	713.62	0.655
2300	0.1513	1.478	766.0	506.40	175.00	782.76	0.647
2400	0.1448	1.558	792.0	546.80	196.00	868.54	0.630
2500	0.1389	1.665	818.0	588.96	222.00	960.00	0.614
2600	0.1333	1.803	844.0	633.17	256.00	1065.18	0.594
2700	0.1280	1.978	871.0	680.43	299.00	1180.88	0.576
2800	0.1230	2.191	898.0	730.25	352.00	1306.46	0.559
2900	0.1181	2.419	926.0	783.77	414.00	1448.57	0.541
3000	0.1135	2.726	955.0	841.64	486.00	1571.21	0.536

Table D.2. *Thermophysical properties of nitrogen*

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (kJ/kg-K)	$\mu \times 10^7$ (N-s/m <sup>2</sup> )	$\nu \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \times 10^3$ (W/m-K)	$\alpha \times 10^4$ (m <sup>2</sup> /s)	$Pr$
100	3.4388	1.070	68.8	2.00	9.34	2.54	0.788
150	2.2594	1.050	100.6	4.45	13.80	5.82	0.765
200	1.6883	1.043	129.2	7.65	18.10	10.28	0.745
250	1.3488	1.042	154.9	11.48	22.30	15.87	0.724
300	1.1233	1.041	178.2	15.86	26.30	22.49	0.705
350	0.9625	1.042	200.0	20.78	30.00	29.91	0.695
400	0.8425	1.045	220.4	26.16	33.80	38.39	0.681
450	0.7485	1.050	239.6	32.01	37.30	47.46	0.674
500	0.6739	1.056	257.7	38.24	40.70	57.20	0.669
550	0.6124	1.065	274.7	44.86	43.90	67.31	0.666
600	0.5615	1.075	290.8	51.79	46.90	77.70	0.667
650	0.5181	1.086	306.2	59.10	49.70	88.33	0.669
700	0.4812	1.098	321.0	66.70	52.40	99.17	0.673
750	0.4490	1.110	335.1	74.62	54.90	110.15	0.677
800	0.4211	1.122	349.1	82.91	57.30	121.29	0.684
850	0.3964	1.134	362.2	91.38	59.60	132.60	0.689
900	0.3743	1.146	375.3	100.28	62.00	144.56	0.694
950	0.3546	1.157	387.6	109.30	64.30	156.72	0.697
1000	0.3368	1.167	399.9	118.73	66.70	169.69	0.700
1100	0.3062	1.187	423.2	138.22	71.50	196.73	0.703
1200	0.2807	1.204	445.3	158.62	76.30	225.73	0.703
1300	0.2591	1.219	466.2	179.91	82.00	259.59	0.693
1400	0.2406	1.220	517.0	214.88	91.00	309.88	0.693
1500	0.2246	1.233	540.6	240.71	100.00	361.21	0.666
1600	0.2105	1.244	563.6	267.70	106.00	404.64	0.662
1700	0.1982	1.255	586.1	295.76	113.00	454.36	0.651
1800	0.1872	1.265	608.3	325.01	120.00	506.94	0.641
1900	0.1773	1.274	630.1	355.38	128.00	566.75	0.627
2000	0.1684	1.282	651.6	386.87	137.00	634.43	0.610
2100	0.1604	1.290	683.0	425.77	147.00	710.55	0.599
2200	0.1531	1.296	709.2	463.08	160.00	805.88	0.575
2300	0.1465	1.303	735.4	502.06	175.00	917.14	0.547
2400	0.1404	1.308	761.7	542.63	196.00	1067.31	0.508
2500	0.1348	1.313	788.0	584.76	222.00	1254.50	0.466
2600	0.1296	1.318	814.2	628.40	256.00	1499.46	0.419
2700	0.1248	1.322	840.3	673.56	299.00	1813.45	0.371
2800	0.1203	1.325	866.3	720.12	352.00	2208.41	0.326
2900	0.1162	1.328	892.0	767.89	414.00	2683.85	0.286
3000	0.1123	1.331	917.4	816.96	486.00	3252.68	0.251

Table D.3. *Thermophysical properties of oxygen*

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (kJ/kg-K)	$\mu \times 10^7$ (N-s/m <sup>2</sup> )	$\nu \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \times 10^3$ (W/m-K)	$\alpha \times 10^4$ (m <sup>2</sup> /s)	$Pr$
100	3.9448	0.962	76.4	1.94	9.25	2.44	0.795
150	2.5846	0.921	114.8	4.44	13.80	5.8	0.766
200	1.9301	0.915	147.1	7.62	18.30	10.36	0.736
250	1.5415	0.915	178.3	11.57	22.55	15.99	0.723
300	1.2837	0.920	207.0	16.13	26.80	22.69	0.711
350	1.0999	0.929	233.5	21.23	29.60	28.97	0.733
400	0.9625	0.942	258.2	26.83	33.00	36.4	0.737
450	0.8554	0.956	281.4	32.90	36.30	44.39	0.741
500	0.7698	0.972	303.3	39.40	41.20	55.06	0.716
550	0.6998	0.988	324.0	46.30	44.10	63.78	0.726
600	0.6414	1.003	343.7	53.58	47.30	73.52	0.729
650	0.5921	1.018	362.3	61.18	50.00	82.96	0.738
700	0.5498	1.031	380.8	69.27	52.80	93.16	0.744
750	0.5131	1.043	398.0	77.57	56.20	105.02	0.739
800	0.4810	1.054	415.2	86.32	58.90	116.18	0.743
850	0.4527	1.065	431.2	98.79	62.10	128.81	0.767
900	0.4275	1.074	447.2	104.60	64.90	141.34	0.740
950	0.4050	1.082	462.1	114.09	68.10	155.4	0.734
1000	0.3848	1.090	477.0	123.97	71.00	169.29	0.732
1100	0.3498	1.103	505.5	144.52	75.80	196.48	0.736
1200	0.3206	1.115	532.5	166.09	81.90	229.1	0.725
1300	0.2960	1.125	558.4	188.63	87.10	261.53	0.721
1400	0.2749	1.127	584.3	212.56	92.30	297.85	0.714
1500	0.2565	1.138	608.6	237.24	98.15	336.15	0.706
1600	0.2405	1.148	632.7	263.09	104.00	376.58	0.699
1700	0.2263	1.158	656.7	290.15	109.50	417.77	0.695
1800	0.2138	1.167	680.8	318.49	115.00	460.91	0.691
1900	0.2025	1.176	705.1	348.19	123.00	516.52	0.674
2000	0.1923	1.184	735.0	382.13	131.00	575.06	0.664
2100	0.1677	1.192	759.0	454.35	145.00	725.09	0.627
2200	0.1487	1.200	783.0	526.57	159.00	891.23	0.591
2300	0.1540	1.207	806.5	523.24	188.50	1014.32	0.516
2400	0.1596	1.214	830.0	519.91	218.00	1125.07	0.462
2500	0.1527	1.220	854.0	560.06	276.50	1484.19	0.377
2600	0.1463	1.226	878.0	600.20	335.00	1867.25	0.321
2700	0.1398	1.232	903.5	647.27	442.50	2569.16	0.252
2800	0.1338	1.238	929.0	694.33	550.00	3320.47	0.209
2900	0.1273	1.243	957.5	752.96	727.00	4591.32	0.164
3000	0.1215	1.249	986.0	811.58	904.00	5959.55	0.136

Table D.4. *Thermophysical properties of carbon dioxide*

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (kJ/kg-K)	$\mu \times 10^7$ (N-s/m <sup>2</sup> )	$\nu \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \times 10^3$ (W/m-K)	$\alpha \times 10^4$ (m <sup>2</sup> /s)	$Pr$
200	2.4797	0.778	101.04	4.07	9.59	4.97	0.820
250	1.0952	0.807	125.89	13.65	12.95	14.66	0.931
300	1.7730	0.851	149.48	8.43	16.55	10.97	0.769
350	1.5168	0.900	172.08	11.35	20.40	14.94	0.759
400	1.3257	0.942	193.18	14.57	24.30	19.46	0.749
450	1.1776	0.981	213.32	18.12	28.30	24.50	0.739
500	1.0594	1.020	232.51	21.95	32.50	30.08	0.730
550	0.9625	1.050	250.73	26.05	36.60	36.22	0.719
600	0.8826	1.080	268.27	30.39	40.70	42.70	0.712
650	0.7899	1.100	284.98	36.08	44.50	51.22	0.704
700	0.7564	1.130	301.28	39.83	48.10	56.27	0.708
750	0.7057	1.150	317.04	44.92	51.70	63.70	0.705
800	0.6614	1.170	332.25	50.24	55.10	71.21	0.706
850	0.6227	1.190	346.91	58.02	58.50	78.95	0.735
900	0.5945	1.200	361.30	60.77	61.80	86.62	0.702
950	0.5571	1.220	375.41	67.39	65.00	95.64	0.705
1000	0.5291	1.230	389.11	73.54	68.10	104.64	0.703
1100	0.4810	1.260	415.00	86.28	74.40	122.76	0.703
1200	0.4409	1.280	440.90	100.00	80.30	142.28	0.703
1300	0.4072	1.300	465.01	114.21	86.20	162.85	0.701
1400	0.3781	1.310	489.13	129.37	92.10	185.96	0.696
1500	0.3529	1.330	512.01	145.10	99.55	212.12	0.684
1600	0.3308	1.340	564.00	170.50	107.00	241.39	0.706
1700	0.3113	1.350	589.00	189.19	116.00	275.99	0.685
1800	0.2940	1.360	614.00	208.82	125.00	312.59	0.668
1900	0.2774	1.690	638.50	230.18	140.50	299.71	0.768
2000	0.2626	1.910	663.00	252.47	156.00	311.02	0.812
2100	0.2488	2.190	687.50	277.25	181.50	333.08	0.832
2200	0.2357	2.560	712.00	302.03	207.00	343.01	0.881
2300	0.2230	3.030	737.00	331.91	247.50	366.27	0.906
2400	0.2106	3.600	762.00	361.80	288.00	379.84	0.953
2500	0.1984	4.240	789.50	400.18	346.50	411.96	0.971
2600	0.1863	4.940	817.00	438.57	405.00	440.09	0.997
2700	0.1743	5.680	848.00	489.44	479.00	483.72	1.012
2800	0.1627	6.400	879.00	540.32	553.00	531.14	1.017
2900	0.1514	7.060	913.50	607.17	636.00	595.01	1.020
3000	0.1406	7.630	948.00	674.03	719.00	670.00	1.006

Table D.5. Thermophysical properties of carbon monoxide

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (kJ/kg-K)	$\mu \times 10^7$ (N-s/m <sup>2</sup> )	$\nu \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \times 10^3$ (W/m-K)	$\alpha \times 10^4$ (m <sup>2</sup> /s)	$Pr$
100	3.445	1.077	69.15	2.01	8.68	2.34	0.857
150	2.261	1.049	100.8	4.46	13.14	5.54	0.805
200	1.6888	1.045	127.4	7.55	17.42	9.89	0.763
250	1.3490	1.043	154.1	11.42	21.43	15.2	0.751
300	1.1233	1.043	178.5	15.89	25.24	21.42	0.742
350	0.9524	1.045	201.0	21.10	28.84	28.7	0.735
400	0.8421	1.049	222.0	26.36	32.25	36.51	0.722
450	0.7483	1.055	241.9	32.33	35.53	45.00	0.718
500	0.6735	1.065	260.8	38.72	38.64	53.87	0.719
550	0.6123	1.076	278.8	45.54	41.59	63.13	0.721
600	0.5613	1.088	296.1	52.75	44.44	72.78	0.725
650	0.5181	1.101	312.8	60.38	—	—	—
700	0.4810	1.114	329.0	68.40	—	—	—
750	0.4490	1.127	344.6	76.75	—	—	—
800	0.4210	1.140	359.9	85.49	—	—	—
850	0.3962	1.152	374.8	98.24	—	—	—
900	0.3742	1.164	389.2	104.01	—	—	—
950	0.3545	1.175	403.3	113.77	—	—	—
1000	0.3368	1.185	417.3	123.93	—	—	—
1100	0.3606	1.204	444.4	123.22	—	—	—
1200	0.2806	1.221	470.9	167.78	—	—	—
1300	0.2591	1.235	496.2	191.54	—	—	—
1400	0.2406	1.247	520.6	216.41	—	—	—
1500	0.2245	1.258	544.3	242.41	—	—	—
1600	0.2105	1.267	—	—	—	—	—
1700	0.1981	1.275	—	—	—	—	—
1800	0.1871	1.283	—	—	—	—	—
1900	0.1773	1.287	—	—	—	—	—
2000	0.1684	1.295	—	—	—	—	—
2100	0.1604	1.299	—	—	—	—	—
2200	0.1531	1.304	—	—	—	—	—
2300	0.1467	1.308	—	—	—	—	—
2400	0.1403	1.312	—	—	—	—	—
2500	0.1347	1.315	—	—	—	—	—
2600	0.1295	1.319	—	—	—	—	—
2700	0.1248	1.322	—	—	—	—	—
2800	0.1203	1.324	—	—	—	—	—
2900	0.1161	1.327	—	—	—	—	—
3000	0.1123	1.329	—	—	—	—	—

Table D.6. *Thermophysical properties of hydrogen*

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (kJ/kg-K)	$\mu \times 10^7$ (N-s/m <sup>2</sup> )	$\nu \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \times 10^3$ (W/m-K)	$\alpha \times 10^4$ (m <sup>2</sup> /s)	$Pr$
100	0.1203	11.315	42.11	35.00	67.00	49.22	0.711
150	0.0801	12.697	55.98	69.85	101.00	99.26	0.704
200	0.0601	13.645	68.13	113.37	131.00	159.75	0.710
250	0.0480	14.177	79.23	186.57	157.00	230.61	0.809
300	0.0401	14.425	89.59	223.61	183.00	316.62	0.706
350	0.0343	14.545	99.39	289.39	204.00	408.36	0.709
400	0.0301	14.595	108.67	361.58	226.00	515.22	0.702
450	0.0267	14.620	117.75	440.76	247.00	632.38	0.697
500	0.0240	14.635	126.42	525.74	266.00	755.89	0.696
550	0.0219	14.650	134.74	616.40	285.00	889.94	0.693
600	0.0200	14.670	142.90	713.13	305.00	1037.52	0.687
650	0.0185	14.695	150.89	815.73	323.00	1188.25	0.686
700	0.0172	14.725	158.46	922.54	342.00	1352.16	0.682
750	0.0160	14.765	166.03	1035.63	360.00	1520.83	0.681
800	0.0150	14.815	173.35	1153.34	378.00	1697.54	0.679
850	0.0130	14.875	180.58	1438.42	395.00	2036.45	0.706
900	0.0134	14.945	187.57	1403.85	412.00	2063.34	0.680
950	0.0127	15.020	194.55	1536.99	430.00	2261.77	0.680
1000	0.0120	15.105	199.70	1660.73	448.00	2466.48	0.673
1100	0.0109	15.290	208.53	1907.56	488.00	2919.54	0.653
1200	0.0100	15.495	226.20	2257.23	528.00	3400.36	0.664
1300	0.0093	15.715	238.45	2577.64	568.00	3907.15	0.660
1400	0.0086	15.935	250.70	2918.65	610.00	4456.62	0.655
1500	0.0080	16.150	262.20	3270.42	655.00	5058.71	0.646
1600	0.0152	16.280	273.70	1806.42	697.00	2825.68	0.639
1700	0.0143	16.580	284.90	1997.72	742.00	3138.06	0.637
1800	0.0135	16.960	296.10	2198.84	786.00	3441.53	0.639
1900	0.0128	17.490	307.15	2408.06	835.00	3742.94	0.643
2000	0.0121	18.250	318.20	2627.06	878.00	3971.93	0.661
2100	0.0115	19.605	330.05	2869.00	1034.00	4576.66	0.627
2200	0.0110	20.960	341.90	3110.95	1190.00	5165.94	0.602
2300	0.0018	32.930	354.20	20155.35	1467.50	24643.79	0.818
2400	0.0010	44.900	366.50	37199.75	1745.00	39447.1	0.943
2500	0.0009	59.435	379.20	40879.39	2250.00	40733.57	1.004
2600	0.0009	73.970	391.90	44559.03	2755.00	42347.37	1.052
2700	0.0008	96.835	407.65	49864.03	3586.50	45185.42	1.104
2800	0.0008	119.700	423.40	55169.02	4418.00	48092.35	1.147
2900	0.0007	149.250	42.00	61967.20	5644.50	53703.12	1.154
3000	0.0007	178.800	447.40	68765.38	6871.00	59064.47	1.164

Table D.7. *Thermophysical properties of steam*

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (kJ/kg-K)	$\mu \times 10^7$ (N-s/m <sup>2</sup> )	$\nu \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \times 10^3$ (W/m-K)	$\alpha \times 10^4$ (m <sup>2</sup> /s)	$Pr$
400	0.5476	2.0078	134.20	30.84	27.00	30.9	0.998
450	0.4846	1.9752	152.25	38.54	31.17	39.94	0.965
500	0.4351	1.9813	170.30	37.09	35.86	37.16	0.998
550	0.3951	2.0010	188.35	45.61	40.95	47.27	0.965
600	0.3619	2.0268	206.40	54.96	46.37	58.41	0.941
650	0.3338	2.0557	224.45	65.14	52.05	70.78	0.920
700	0.3099	2.0867	242.50	76.16	57.96	84.41	0.902
750	0.2892	2.1191	260.55	88.01	64.08	99.28	0.886
800	0.2710	2.1525	278.60	100.69	70.39	115.33	0.873
850	0.2550	2.1868	296.95	122.11	76.85	132.55	0.921
900	0.2409	2.2216	317.00	128.55	83.47	150.88	0.852
950	0.2282	2.2568	338.05	116.43	90.22	137.79	0.845
1000	0.2167	2.2921	358.50	131.62	97.09	155.99	0.844
1100	0.1970	2.3621	397.20	148.17	111.15	175.21	0.846
1200	0.1806	2.4302	432.70	165.41	125.58	195.43	0.846
1300	0.1667	2.513	464.60	278.71	156.29	373.09	0.747
1400	0.1548	2.591	492.80	318.40	187.00	466.31	0.683
1500	0.1444	2.682	517.40	358.20	203.00	524.00	0.684
1600	0.1354	2.795	563.00	415.83	219.00	578.72	0.719
1700	0.1274	2.946	587.50	461.19	241.00	642.18	0.718
1800	0.1203	3.148	612.00	508.94	263.00	694.76	0.733
1900	0.1138	3.422	635.50	558.41	298.00	765.20	0.730
2000	0.1080	3.786	659.00	610.43	333.00	814.73	0.749
2100	0.1025	4.330	681.00	665.50	396.00	892.28	0.746
2200	0.0976	4.874	703.00	720.58	459.00	965.27	0.746
2300	0.0927	5.736	722.50	780.26	574.50	1080.29	0.722
2400	0.0883	6.597	742.00	839.94	690.00	1183.99	0.709
2500	0.0837	7.870	758.50	907.06	900.00	1366.10	0.664
2600	0.0796	9.142	775.00	974.18	1110.00	1526.22	0.638
2700	0.0749	10.916	786.50	1050.48	1465.00	1790.99	0.587
2800	0.0708	12.690	798.00	1126.78	1820.00	2025.09	0.556
2900	0.0660	15.060	804.00	1219.49	2380.00	2395.8	0.509
3000	0.0617	17.430	810.00	1312.20	2940.00	2732.53	0.480

Analytic combustion

With thermodynamics, chemical kinetics and mass transfer

Anil W.date

Indian institute of technology, Bombay