

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Installations Energétiques et Turbomachines

Par :

BEKOUCHE ISLAM

Thème

Etude énergétique d'une chaudière à vapeur MIRA 4000

Soutenu le 25/06/2023 devant le jury composé de :

Mr. MENDIL

President

Mr. ADNANI

Examineur

Mr. M'HAMDI

Rapporteur

Année Universitaire 2022-2023



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité
scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 Décembre 2020
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : BEKOUCHE
Prénom : ISLAM
Matricule : 181833007599
Spécialité et/ou Option : Installations Energétiques et urbomachines
Département : GENIE MECANIQUE
Faculté : TECHNOLOGIE
Année universitaire : 2022/2023

Et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) : Master

Intitulé: **Etude énergétique d'une chaudière à vapeur MIRA 4000**

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Bejaia le

23/06/2023

Signature de l'intéressé

Lu et approuvé

.....

Remerciement

Avant tout, je tiens à remercier le Bon Dieu de m'avoir donné la santé et le courage qui m'ont permis d'atteindre ce modeste mémoire.

Je souhaite exprimer ma sincère gratitude à mes parents, qui m'ont soutenu et ont toujours été là pour moi, sans jamais refuser leur aide.

Je tiens également à exprimer mes plus sincères remerciements à mon encadreur, M. M'HAMDI - M, qui m'a soutenu et guidé tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que

M. HANAFI - A, qui m'a encadré lors de mon stage en entreprise.

Je suis reconnaissant envers tous les enseignants de l'université de A/MIRA de BEJAIA, et en particulier envers mes enseignants, pour leur partage de savoir, leur disponibilité et leur gentillesse au cours de ces deux dernières années.

Je souhaite exprimer ma chaleureuse gratitude aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer mon travail.

Enfin, je tiens à exprimer tous mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

Je leur suis très reconnaissant.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

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

Mes frères et ma sœur.

Tous les membres de la famille Que Dieu les garde et protège.

Tous mes enseignants.

A tous mes amis.

Je dédie enfin ce travail à :

Mon frère B. A/Rahim

Mon ami A .Walid

Mon ami S. Samir

Merci pour tous.

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I: Description de la chaudière étudiée

I.1. Introduction..... 3

I.2. Eau d'alimentation des chaudières..... 3

 I.2.1. Qualité d'eau requise 3

 I.2.2. Traitement des eaux des chaudières..... 4

I.3. Description de la chaudière étudiée..... 6

 I.3.1. Description détaillée de la chaudière à vapeur MIRA D'ECFERAL..... 6

 I.3.2. Fiche technique de la chaudière MIRA 4000..... 7

 I.3.3. Les principes éléments de la chaudière:..... 7

I.4. Encolleuse :..... 11

I.5. Motivation..... 12

I.6. Conclusion 13

Chapitre II: Etude de la combustion

II.1. Introduction 14

II.2. Combustion..... 14

 II.2.1. Définition de la combustion 14

 II.2.2. Le pouvoir calorifique 14

 II.2.3. Paramètres de la combustion 15

 II.2.4. Conditions nécessaires pour une combustion parfaite..... 16

 II.2.5. Les différents types ou aspects de combustion..... 16

II.3. Le comburant.....	17
II.4. Type de combustible.....	17
II.4.1. Composition volumique du gaz naturel.....	17
II.4.2. Masse volumique du gaz naturel.....	17
II.4.3. Pouvoir calorifique inferieur (PCI).....	17
II.4.4. Composition massique du gaz naturel.....	17
II.5. Débit masse de combustible.....	18
II.6. Etude thermochimique de la combustion de gaz naturel.....	19
II.6.1. Equations de la combustion.....	19
II.6.2. Equation stœchiométrique de la combustion du gaz naturel.....	20
II.6.3. La quantité d'air effective.....	20
II.7. Le débit-masse du gaz de combustion.....	21
II.8. Rendement de combustion.....	21
II.9. Conclusion.....	21

Chapitre III: Bilan énergétique et exergetique de la chaudière MIRA 4000

III.1. Introduction.....	22
III.2. Bilan énergétique de la chaudière.....	22
III.2.1. La puissance utile.....	23
III.2.2. La puissance introduite.....	24
III.2.3. Les pertes globales.....	24
III.2.4. Rendement utile.....	29
III.2.5. Rendement de la combustion.....	30
III.2.6. Discussion et analyse des résultats.....	31
III. 3. Bilan exergetique de la chaudière.....	32
III.3.1. Introduction.....	32
III.3.2. Copuissance - transformation du réseau d'eau.....	33

III.3.3. Copuissance - transformation reçue par la chaudière.....	34
III.3.4. Perte exégétique totale dans la chaudière.....	35
III.3.5. Rendement exégétique de la chaudière	35
III.4. Conclusion.....	35

Chapitre IV: Etude d'un économiseur de chaleur pour la chaudière MIRA

4000

IV.1. Introduction.....	36
IV.2. Définition	37
IV.3. Les types des économiseurs	37
IV.4. Principe de fonctionnement d'un économiseur.....	37
IV.5. Economiseur proposée	38
IV.6. Avantage d'un économiseur de chaleur	39
IV.7. Application à la chaudière MIRA 4000	39
IV.8. Flux de chaleur échangé.....	40
IV.8.1. Calcul chaleur spécifique de chaque produit de la combustion à l'entrée de l'économiseur.....	41
IV.8.2. Calcul chaleur spécifique de chaque produit de la combustion à la sortie l'économiseur	42
IV.8.3. Calcul de la chaleur spécifique moyenne des fumées entre l'entré et la sortie de l'économiseur.....	44
IV.9. Discussion sur les résultats :	44
IV.10. Conclusion	46
Conclusion générale.....	47
Références bibliographiques	49
Annexes.....	51

Résumé

Liste des figures

Figure I.1: Filtre anti sable.....	4
Figure I.2: Principe de fonctionnement d'un adoucisseur à résine.....	5
Figure I.3: Bâche alimentaire.....	5
Figure I.4: Schéma de principe de la chaudière ECFERAL MIRA.....	7
Figure I.5: Bruleur (N7-4500).....	8
Figure I.6: Schéma et composantes d'un brûleur à gaz.....	9
Figure I.7: Pompe d'alimentation (CR5-29).....	10
Figure I.8: Régulateur de pression.....	10
Figure I.9: Encolleuse.....	11
Figure I.10: Schéma à suivre.....	12
Figure III.1: Bilan énergétique de la chaudière.....	22
Figure III.2: Diagramme de changement de phase de l'eau.....	35
Figure III.3: Le bilan énergétique de la chaudière MIRA 4000.....	31
Figure III.4: Les pertes globales.....	31
Figure IV.1: Economiseur vue de l'intérieur.....	36
Figure IV.2: Principe de fonctionnement d'un économiseur.....	38
Figure IV.3: Economiseur Babcock Wanson.....	38

Liste des tableaux

Tableau I.1: Fiche technique de la chaudière MIRA 4000	7
Tableau I.2: Fiche technique de Bruleur (N7-4500).....	9
Tableau I.3: Fiche technique de la pompe d'alimentation (CR5-29).	10
Tableau II.1: Analyse des gaz d'échappement	15
Tableau II.2: Composition volumique en % du gaz naturel	17
Tableau II.3: Composition massique en % du gaz naturel	18
Tableau III.1: Le coefficient dépend de la nature combustible	25
Tableau III.2: Tableau récapitulatif des résultats obtenus.....	30
Tableau IV.1: Les différents types des économiseurs.	37
Tableau IV.2: Composition des fumées.....	41
Tableau IV.3: tableau récapitulatif des résultats obtenus.....	45

Nomenclature

Symboles	Définition	Unité
T	Température	K
C _i	Fraction volumique	%
P _C	Pression de combustible	Pa
V _C	Débit volumique de combustible	m ³ /s
R	Constante molaire des gaz parfaits	J/mol .K
m _i	Masse molaire de chaque élément de combustion	g/mol
\dot{N}_C	Débit quantité molaire de combustible	kmol/s
M _c	Masse molaire de combustible	kg/kmol
\dot{m}_C	Débit de masse de combustible	kg/s
N _{O₂ st}	Quantité d'oxygène stœchiométrique	kmol _(O₂) / kmol _(GN)
N _{A st}	Quantité d'air stœchiométrique	kmol _(air) / kmol _(GN)
N _A	Quantité d'air effective	kmol/kmol
M _a	Masse molaire de l'air	kg/kmol
\dot{m}_a	Débit-masse de l'air	kg/s
\dot{m}_f	Débit masse de gaz de combustion	kg/s
q _m	Débit massique de la vapeur	kg/s
h _e	Enthalpie de liquide comprimé	kJ/kg
h _L	Enthalpie de liquide saturée	kJ/kg
h _v	Enthalpie vapeur saturée	kJ/kg
h _s	Enthalpie vapeur surchauffée	kJ/kg
L _v	Chaleur latente	kJ/kg
P _i	Puissance introduite	kW
P _{fum}	pertes par fumée	kW
S	Surface	m ²
P _{ray}	Perte par rayonnement	kW
h	Coefficient d'échange convectif de la chaleur	W.m ² /K
Nu	Nombre de Nusselt	
C et n	Coefficients de corrélation	

Ra	Nombre de Rayleigh	
Pr	Nombre de Prandtl	
Gr	Nombre de Gras Hof	
g	constante de gravitation	m/s ²
D	Diamètre	m
P _{par}	Pertes par parois	kW
P _{conv}	Pertes par convection	kW
P _{purg}	Perte par purge	kW
y	Estimation de perte par purge	%
P _{glob}	Pertes globale	kW
\dot{E}_{we}^-	Copuissance - transformation du réseau d'eau	kW
\dot{E}_{wc}^+	Copuissance - transformation reçue par la chaudière	kW
\dot{L}	Perte exergetique totale dans la chaudière	kW
K	Coenthalpie d'eau	kJ/kg
S _e S _s	Entropie	kJ/kg .K
ϕ	Flux thermique de l'économiseur	kW
\dot{m}_i	Débit massique des produits des fumées	kg/s
Y _i	Fraction massique de chaque produit de la combustion	
\dot{m}_e	Débit massique d'eau	kg/s
μ_i	Fraction massique du composant	
R	Coefficient dépend de la nature de combustible	
H _{f,e}	Enthalpie massique des gaz de fumés à l'entrée de l'économiseur	kJ/kg
H _{f,s}	Enthalpie massique des gaz de fumés à la sortie de l'économiseur	kJ/kg
H _{e,e}	Enthalpie massique d'eau à l'entrée de l'économiseur	kJ/kg
H _{e,s}	Enthalpie massique d'eau à la sortie de l'économiseur	kJ/kg
T _{f,e}	Température des fumées à l'entrée de l'économiseur	K
T _{f,s}	Température des fumées à la sortie de l'économiseur	K
T _{e,e}	Température d'eau à l'entrée de l'économiseur	K
T _{e,s}	Température d'eau à la sortie de l'économiseur	K

Symboles grecs

η	Rendement	
ε	Emissivité du matériau	
Σ	Constante de Boltzmann	$W/m^2 \cdot K^4$
ν	Viscosité cinématique	m^2/s
λ	Conductivité thermique	$W/m \cdot K$
β	Coefficient de dilatation	K^{-1}
Λ	Facteur d'air	
ρ	Masse volumique	kg/Nm^3

Indice et abréviation

PC	Pouvoir calorifique	kJ/kg
PCI	pouvoir calorifique inférieur	kJ/kg
PCS	pouvoir calorifique supérieur	kJ/kg
PPM	Partie par million	
C_{pf}	Chaleur spécifique des fumées	kJ/kg
C_{pi}	Chaleur spécifique de chaque produit de combustion	$kJ/kg \cdot K$
$C_{pf(M)}$	chaleur spécifique moyenne des fumées	$kJ/kg \cdot K$
ΔT	Différent température	K
Δk_{oc}	Pouvoir exergétique du combustible	kJ/kg
TH	Titre Hydrotimétrique	$^{\circ}F$
Comb	Combustion	
fum	Fumée	
C	Combustible	
St	Stœchiométrie	



Introduction générale

Introduction générale

L'énergie joue un rôle essentiel dans le développement des sociétés. À l'échelle mondiale, la civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin du 18ème siècle, puis du pétrole au milieu du 20ème siècle. Le secteur industriel est considéré comme l'un des plus gros segments de la demande énergétique, c'est pourquoi l'optimisation des coûts énergétiques en maîtrisant les pertes d'énergie est aujourd'hui au cœur des préoccupations de chaque entreprise industrielle.

La création de chaleur pour les procédés techniques représente le principal besoin énergétique, et la chaleur industrielle est produite à partir de diverses sources d'énergie, telles que l'utilisation de l'eau chaude, de la vapeur et de l'air chaud.

Dans l'industrie, la vapeur est largement utilisée comme source d'énergie pour de nombreux procédés variés. La vapeur est un fluide caloporteur abondant, facilement transportable et non toxique. La production de vapeur nécessite l'utilisation d'un combustible et d'un générateur de vapeur, tel qu'une chaudière.

Une chaudière est un dispositif qui utilise un combustible pour fournir de l'énergie à un fluide caloporteur, permettant ainsi de produire un fluide avec des caractéristiques spécifiques adaptées à son utilisation. À l'intérieur de la chaudière, le fluide caloporteur peut être chauffé uniquement (en restant à l'état liquide), chauffé et vaporisé, ou chauffé, vaporisé puis surchauffé, ce qui implique une transition de l'état liquide à l'état gazeux.

Différentes études ont été réalisées pour évaluer le rendement énergétique et exergetique globale, minimiser les pertes d'énergie et réduire la consommation de carburant dans les chaudières. Nous avons eu l'opportunité de mener notre propre étude en utilisant les connaissances acquises lors de notre stage, ce qui nous a permis d'aborder l'aspect pratique de manière plus approfondie.

Le complexe Bejaia Emballage comporte service distinct pour laquelle l'utilisation de vapeur d'eau est plus qu'indispensable, ce service est comme « Encolleuse ».

Ce mémoire se concentre sur une étude énergétique d'une chaudière à vapeur de type MIRA 4000. Afin de mener à bien cette recherche, nous avons structuré ce document en quatre chapitres, accompagné d'une introduction générale et d'une conclusion générale.

Le premier chapitre décrit en détail le système étudié, à savoir la chaudière MIRA 4000, ainsi que ses composants.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la combustion du gaz naturel dans la chaudière et à la détermination des différents paramètres nécessaires au calcul du rendement.

Le troisième chapitre présente les méthodes de calcul du rendement énergétique et exergetique d'une chaudière.

Enfin, le quatrième et dernier chapitre aborde la proposition d'une étude d'un économiseur de chaleur visant à réduire les pertes de chaleur par les fumées pour notre cas au niveau d'entreprise.

Chapitre I

Description de système a étudiée

I.1. Introduction

Dans le secteur industriel, les appareils de chauffage tels que les chaudières sont largement utilisés. Les chaudières sont souvent soumises à des exigences réglementaires concernant leur raccordement au réseau de distribution et d'alimentation. Par conséquent, il est impératif d'utiliser des dispositifs de commutation de puissance, de commande, de protection et de signalisation afin d'assurer un fonctionnement optimal et fiable.

I.2. Eau d'alimentation des chaudières

L'eau utilisée dans la chaudière provient d'un forage et, après traitement, l'apport d'eau dans la chaudière est assuré par une pompe d'alimentation (avec une pompe de secours) fonctionnant à une pression légèrement supérieure à la pression interne de la chaudière. Deux opérations, l'extraction et la purge continue, sont effectuées pour maintenir la qualité de l'eau dans la chaudière. L'eau d'alimentation contient des traces de produits de traitement, de sels minéraux et d'impuretés diverses. Les résidus se déposent au fond du ballon sous forme de boues et doivent être évacués à l'aide d'un robinet d'extraction spécial.

La manipulation de ce robinet doit être effectuée de manière :

- Rapide et brusque.
- De courte durée (afin de limiter l'entraînement excessif d'eau avec les boues).
- Répétée plusieurs fois par jour.

Ces mesures permettent d'éliminer efficacement les boues accumulées dans la chaudière tout en maintenant son bon fonctionnement.

I.2.1. Qualité d'eau requise

- Absence de tartre : Si l'eau utilisée est trop dure, il y aura la formation de dépôts de tartre qui réduiront le transfert de chaleur et, par conséquent l'efficacité de la chaudière.
- Absence de la corrosion : Les gaz dissous en particulier l'oxygène peut entraîner la corrosion des surfaces métalliques de la chaudière.
- PH adéquat : Une eau trop acide peut corroder les parois de la chaudière, tandis qu'une eau trop alcaline peut provoquer la formation de mousses indésirables. Le pH de l'eau d'alimentation doit être maintenu entre 8,5 et 9,5 pour une performance optimale de la chaudière.

Afin de protéger la chaudière de ces contaminants, ils devraient être contrôlés ou éliminés, grâce à des traitements différents.

I.2.2. Traitement des eaux des chaudières

L'eau est le fluide caloporteur le plus couramment utilisé dans les systèmes de chauffage. Cependant, l'eau contient des composés chimiques dissous qui peuvent entraîner des dommages aux matériaux constituant la chaudière. Le traitement de l'eau de la chaudière vise à garantir un rendement maximal de la chaudière, à la protéger et à prolonger sa durée de vie.

Les principaux traitements possibles pour amener l'eau d'alimentation du réseau du vapeur dans des valeurs correctes sont :

I.2.2.1. Filtre anti sable

Comme son nom l'indique, son rôle est de filtrer les particules de sable afin de préparer l'eau avant son passage dans l'adoucisseur.



Figure I.1: Filtre anti sable. [14]

I.2.2.2. Adoucisseur

Un adoucisseur à résine, technique traditionnelle, fonctionne grâce à des billes de résine sur lesquelles sont fixés des ions sodium (Na^+). Les ions calcium (Ca^{2+}) de l'eau dure sont échangés lors de leur passage sur la résine par des ions Na^+ . Lorsque tous les ions Na^+ de la résine sont consommés, il faut régénérer l'adoucisseur. On lui apporte alors une solution saturée en sel (chlorure de sodium NaCl) riche en ions Na^+ . De leur côté, les ions calcium (Ca^{2+}) sont évacués à l'égout avec les eaux de rinçage.

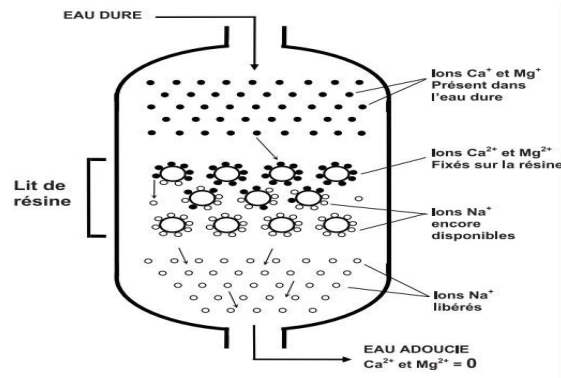


Figure I.2: Principe de fonctionnement d'un adoucisseur à résine. [1]

L'eau est dite adoucie ou bien correcte si le TH (titre hydrotimétrique) est égale à 0 °F. Elle ne contient ni Calcium (Ca^{2+}), ni magnésium (Mg^{2+}), et il ne peut y avoir combinaison chimique avec les Carbonates, naturellement présents dans l'eau, pour former du tartre.

I.2.2.3. Elimination des gaz (traitement chimique)

Les gaz contenus dans l'eau d'alimentation (oxygène, azote, dioxyde de carbone) sont éliminés en injectant du sulfite de sodium, ce qui augmente la salinité, et en augmentant la température dans le ballon de préchauffe.

I.2.2.4. La bêche alimentaire

La bêche alimentaire est un réservoir cylindrique en acier inoxydable, positionné verticalement et monté sur un socle et calorifugée.

La bêche alimentaire sert à réserver l'eau pour alimenter une chaudière à vapeur, garantissant ainsi un approvisionnement en eau constant et sans interruption. L'eau d'alimentation entre dans la bêche à une température d'environ 20°C et est préchauffée jusqu'à 80°C à l'aide de la vapeur provenant de la chaudière.



Figure I.3: Bêche alimentaire. [1]

I.3. Description de la chaudière étudiée

I.3.1. Description détaillée de la chaudière à vapeur MIRA D'ECFERAL

Les chaudières à vapeur MIRA D'ECFERAL sont le fruit d'un effort de plusieurs années de recherches, de mise au point, de perfectionnement de fabrication et de contrôle.

Tous les calculs des parties sous pression, le choix des nuances d'aciers de construction, des nuances des tubes de fumées, du choix des procédures de soudage ainsi que les diverses recommandations de sécurité sont faits suivant le code de construction des générateurs de vapeur, normes algériennes équivalentes aux normes européennes.

La chaudière à vapeur MIRA D'ECFERAL est de type horizontal, à tube de fumée et à trois parcours permettant un rendement maximal. Elle est fabriquée conformément à la réglementation en vigueur en Algérie relative aux équipements sous pression de vapeur, elle est disposée sur un socle en poutrelle d'acier supportant en plus de corps tous les accessoires nécessaires à son bon fonctionnement, présentant ainsi un ensemble compact. Elle est constituée d'un enveloppe cylindrique, fermée des deux côtés par des plaques tubulaires, sur lesquelles sont soudés des tubes, et un foyer par où circule la flamme et les fumées, ils sont noyés dans leur partie extérieure dans l'eau. Le corps cylindrique (virole) comporte des ouvertures appelées, trous de visite pour permettre l'accès et la visite des faisceaux tubulaires et corps intérieurs.

L'ensemble de la chaudière est calorifugé en laine de roche pour minimiser les déperditions de chaleur, et isolé par une tôle de protection en inoxydable, et équipée d'une grande passerelle avec échelle.

Elle est équipée d'une armoire de commande dans toutes les fonctions de réglage et de commande sont intégrées. Dont les réglages de la puissance, la pression de service, le niveau d'eau ainsi que la purge. Ces principaux avantages sont :

- Grandes capacités d'enregistrement des paramètres et messages de fonctionnements.
- Optimisation simplifiée de toutes les fonctions de mesure et de réglage avec affichage de plusieurs paramètres sur écran tactile.
- Intégration des fonctions de contrôle et de protection. [1]

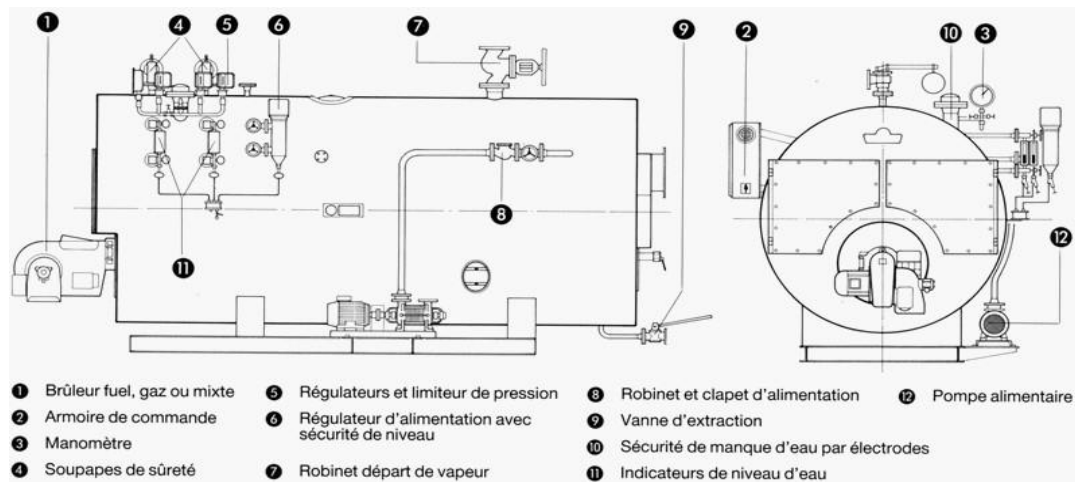


Figure I.4: Schéma de principe de la chaudière ECFERAL MIRA. [1]

I.3.2. Fiche technique de la chaudière MIRA 4000

Tableau I.1: Fiche technique de la chaudière MIRA 4000. [1]

Type	Chaudière à tube de fumées
Position	Horizontale
Fluide	Vapeur d'eau surchauffée
Production vapeur	4000 kg/h
Puissance calorifique	2976 kW
Contenance max	10 020 litres
Pression de timbre (max)	12 bars
Pression d'épreuve	18 bars
Température maximale	195 °C
Surface de chauffe	100 m ²
Encombrement (sans accessoires)	Largeur : 2250 mm
	Longueur : 5150 mm (sans brûleur)
	Hauteur : 2800 mm
Poids à vide	10 200 kg

I.3.3. Les principes éléments de la chaudière

I.3.3.1. Accessoires et robinetterie

- Vanne d'eau d'alimentation.
- Filtres d'eau d'alimentation.
- Clapets anti-retour.

- Vanne de départ vapeur.
- Vanne de purge et de vidange.
- Deux soupapes de sécurité.
- Deux indicateurs de niveaux d'eau à glace réfractaire.
- Bloc de sondes de niveaux d'eaux à électrodes.
- Filtre à gasoil.
- Un manomètre.
- Trois prostates.
- Voyant de flamme.
- Sirène.

I.3.3.2. Armoire électrique de commande

Une armoire électrique de commande est fournie avec la chaudière et avec les caractéristiques suivantes :

- Rassemble toutes les commandes automatiques et manuelles des auxiliaires et des appareillages de sécurité.
- Assurer le fonctionnement automatique de la chaudière.

I.3.3.3. Bruleur

Le bruleur est la partie cruciale dans la chaudière, il est constitué principalement d'un distributeur d'air de combustion et d'un injecteur de combustible.

Il a pour fonction de mélanger le combustible avec l'air et de fournir de l'énergie grâce à la combustion ainsi obtenu.



Figure I.5: Bruleur (N7-4500). [1]

a) Fiche technique de Bruleur (N7-4500)

Les caractéristiques de ce bruleur sont classées dans le tableau suivant :

Tableau I.2: Fiche technique de Bruleur (N7-4500). [1]

Puissance min/max	(kW)	600-4200
Pression min/max	(mbar)	50-500
Puissance moteur	(kW)	7,5
Poids	(kg)	500

b) Composantes d'un bruleur à gaz

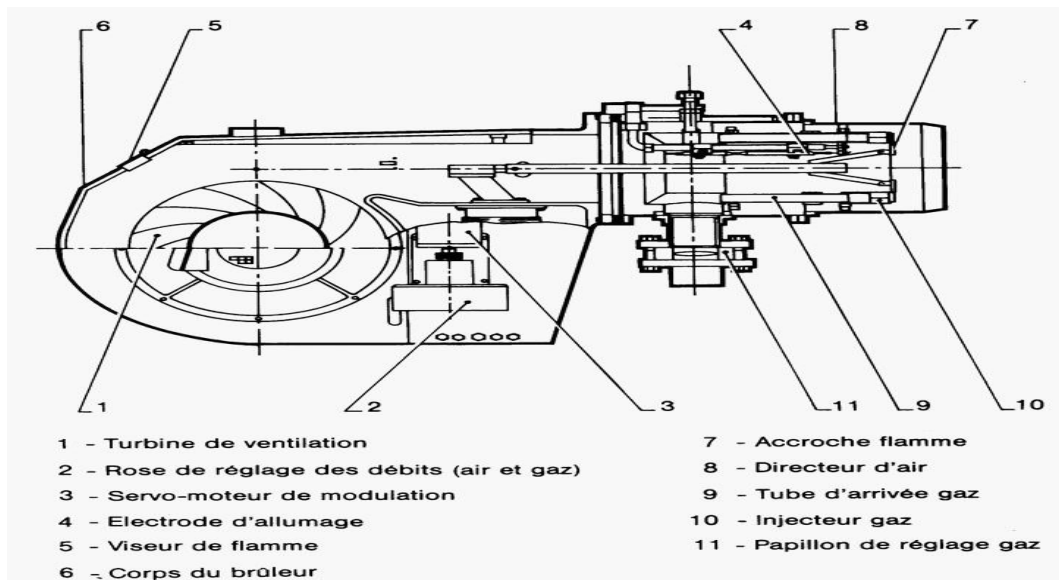


Figure I.6: Schéma et composantes d'un brûleur à gaz. [1]

I.3.3.4. Pompe

Ces dispositifs sont conçus pour faciliter le transfert d'énergie entre le fluide et un dispositif mécanique approprié. Selon les conditions d'utilisation, ces machines peuvent transmettre principalement de l'énergie potentielle au fluide en augmentant la pression en aval, ou principalement de l'énergie cinétique en mettant les fluides en mouvement. Voici quelques principes couramment utilisés dans ce contexte:

- **Pompe d'alimentation**

Une pompe à haute pression, sa pression doit être supérieure à la pression de travail de la chaudière.



Figure I.7: Pompe d'alimentation (CR5-29). [1]

a) Les différentes caractéristiques de la pompe d'alimentation (CR5-29)

Tableau I.3: Fiche technique de la pompe d'alimentation (CR5-29). [1]

Pression max	(bar)	25
Température max	(°C)	120
Débit nominal	(m³/h)	5,8
Puissance de moteur	(kW)	4
Hauteur manométrique totale(m)		150,4
Fréquence d'alimentation	(Hz)	50
Rendement	(%)	88,1

- **Pompe et régulateur de pression**

La pompe qui aspire le gaz naturel a également pour mission de maintenir, via un régulateur, une pression suffisante au gaz pour permettre sa pulvérisation.



Figure I.8: Régulateur de pression. [1]

I.3.3.5. Foyer (chambre à combustion)

Le foyer joue un rôle crucial en assurant une combustion dans des conditions optimales, ce qui inclut :

- La sécurité, garantissant la stabilité des flammes.

- Un rendement élevé, minimisant la présence de gaz et de particules non brûlés, ainsi qu'un excès d'air réduit au minimum.

I.3.3.6. Soupape de sécurité

Les soupapes de sécurité ont pour fonction d'évacuer la vapeur en cas de dépassement de la pression maximale autorisée dans la chaudière. Cela permet de préserver l'intégrité des différents éléments du circuit et d'éviter toute explosion de la chaudière. [1]

I.4. Encolleuse

Cette machine est alimentée en vapeur par la chaudière. Son principe de fonctionnement est le suivant : les fils sont immergés dans un bassin de colle, puis la vapeur les sèche afin de les rendre rigides.



Figure I.9 : Encolleuse. [1]

I.5. Motivation

Afin d'analyser la chaudière MIRA 4000, nous présentons le schéma ci-dessous qui synthétise l'étude des chapitres II, III et IV.

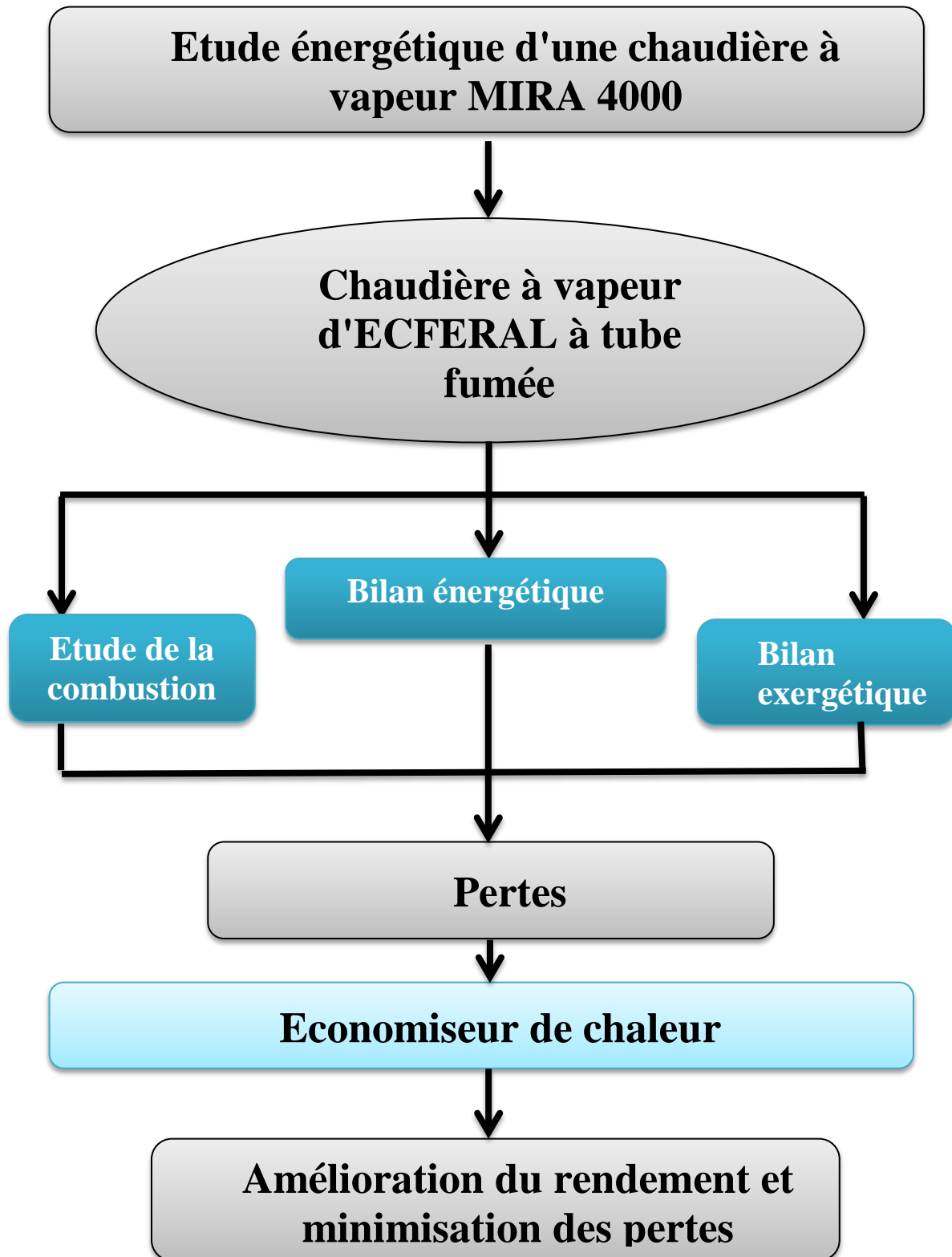


Figure I.10 : Schéma à suivre

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude descriptive en présentant les différents équipements du procédé. Cette étude nous a permis de comprendre le fonctionnement de la chaudière MIRA 4000, ainsi que les dispositifs de sécurité actuellement installés pour garantir son bon fonctionnement.

Chapitre II

Etude de la combustion

II.1. Introduction

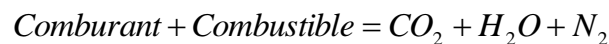
La production de vapeur au niveau de la chaudière MIRA 4000 nécessite une quantité de chaleur suffisante et qui provient dans ce cas de gaz naturel. Le calcul d'une chaudière implique généralement une compréhension des principaux phénomènes physiques ou chimiques associés.

Dans ce chapitre nous évoquerons le phénomène de combustion se déroulant dans le foyer et déterminer le rendement de la combustion.

II.2. Combustion

II.2.1. Définition de la combustion

La combustion est une réaction chimique dans laquelle le carbone et l'hydrogène des combustibles réagissent avec l'oxygène pour former du dioxyde de carbone (CO_2), de la vapeur d'eau (H_2O) et, théoriquement, de l'azote (N_2) qui reste neutre dans la réaction de combustion.



La combustion ne peut se produire que lorsqu'il y a trois éléments réunis : un combustible, un comburant et une source d'énergie d'activation. On appelle cela le "triangle du feu".

Dans le contexte de la chaudière, l'objectif de la combustion est d'exploiter au maximum l'énergie chimique contenue dans le combustible. Cette énergie est libérée sous forme de chaleur, dans un processus appelé réaction exothermique, souvent accompagnée d'une flamme. La chaudière récupère cette chaleur pour produire de la vapeur.

II.2.2. Le pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique (**PC**) d'un combustible représente l'énergie libérée sous forme de chaleur par unité de masse lors de sa combustion. Il est exprimé en (kJ/kg) et peut également être exprimé en (kJ/m³) s'il est volumétrique.

Lorsque le combustible (tel que le bois, le gaz, le fioul, etc.) brûle, il produit de la vapeur d'eau. Cette vapeur d'eau, lorsqu'elle passe de l'état gazeux à l'état liquide, libère de l'énergie appelée chaleur latente de liquéfaction.

Le pouvoir calorifique supérieur (**PCS**) du combustible correspond à l'énergie totale produite par la combustion complète d'un kilogramme de combustible (ou d'un mètre cube pour le gaz), en prenant en compte la chaleur latente de condensation de toute l'eau formée.

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

Le PCS peut être calculé en ajoutant la chaleur latente d'évaporation à la valeur du PCI.
 $PCS = PCI + \text{chaleur latente d'évaporation}$. [2]

II.2.3. Paramètres de la combustion

II.2.3.1. Analyse des gaz de fumée

Avec la présentation d'un analyseur des gaz fumés :

Tableau II.1: analyse des gaz d'échappement.

T_{air} (°C)	T_{fum} (°C)	O_2 (%)	CO (PPM)	CO_2 (%)	Λ
22	190	1,87	10	10,84	1,09

II.2.3.2. Teneur en CO_2 et O_2

La combustion peut être caractérisée par l'excès d'air (Λ) ou la teneur en O_2 ou encore la teneur en CO_2 des fumées. A l'aide du taux de $CO_{2\text{max}}$, propre à chaque carburant et la mesure d'oxygène utilisé ; la concentration volumique du dioxyde de carbone peut être calculée par la formule suivante.

$$CO_2 \% = CO_{2\text{max}} \% \cdot [1 - (O_2 \% / 21)] \quad (\text{II.1})$$

La teneur maximale en CO_2 que l'on peut atteindre dans les gaz de combustion est de **15,2 %** pour le fioul et de **11,9 %** pour le gaz naturel. Pratiquement, il est impossible de régler le brûleur à ces valeurs sans produire d'imbrulés (suie, CO). [3]

Généralement les valeurs cibles sont de :

- **12,5 %** pour les chaudières fuel de moins de 400 kW.
- **13 %** pour les chaudières fuel de plus de 400 kW.
- **10 %** pour les chaudières gaz naturel.

II.2.3.3. Excès d'air

L'excès d'air exprime la quantité d'air nécessaire à la combustion complète du combustible. Un trop faible excès d'air peut conduire à une combustion incomplète, des

fumés noirs, un étouffement de four. Un trop large excès d'air conduit essentiellement à une perte de rendement, cette combustion est incomplète cela peut provoquer des dépôts de suies, Co.

Le calcul de lambda se fait à partir de la connaissance du CO_{2max} du carburant sélectionné et du CO_2 calculé, en utilisant la formule suivant. [6]

$$\Lambda = CO_{2max} \% / CO_2 \% = 21 / (21 - O_2 \%) \quad (\text{II.2})$$

II.2.4. 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.

II.2.5. Les différents types ou aspects de combustion

Il existe deux types de combustions différents:

II.2.5.1. Combustion complète avec excès d'air

Il s'agit d'une combustion complète réalisée en présence d'un volume d'air supérieur à celui requis pour une combustion stœchiométrique. Cela garantit que tous les éléments du combustible entrent en contact avec de l'oxygène avant d'être évacués du foyer, évitant ainsi la production de monoxyde de carbone (CO).

L'excès d'air utilisé avec les combustibles liquides et gazeux est généralement similaire et plus faible que celui nécessaire pour les combustibles solides.

Ce type de combustion est couramment utilisé dans de nombreuses applications industrielles, y compris les chaudières, où il est recherché pour atteindre un rendement optimal.

II.2.5.2. Combustion réductrice ou en manque d'air

La combustion est qualifiée de réductrice (ou en manque d'air) lorsque le volume d'air nécessaire à la combustion d'une unité de combustible est inférieur au volume d'air stœchiométrique. Dans ce cas, tout l'oxygène disponible est néanmoins utilisé, ce qui signifie qu'il n'y a pas d'oxygène présent dans les fumées. Cependant, cette combustion réductrice entraîne la formation de monoxyde de carbone (CO) et des résidus solides non brûlés en raison du manque d'air. [2]

II.3. Le comburant

C'est en général de l'air ambiant (21% O₂ en volume, 79% N₂ en volume et quelques gaz rares).

II.4. 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...).

Le combustible utilisé est le gaz naturel, c'est le combustible le plus consommé par les industries algériennes.

II.4.1. Composition volumique du gaz naturel

Tableau II.2: Composition volumique en % du gaz naturel. [2]

Constituants	Formule chimique	Teneur volumique Ci (%)
Méthane	CH ₄	82,52
Ethane	C ₂ H ₆	7,92
Propane	C ₃ H ₈	2,06
N-Butane	C ₄ H ₁₀	0,48
I-Butane	ISO-C ₄ H ₁₀	0,32
N-Pentane	N-C ₅ H ₁₂	0,11
Hexane	C ₆ H ₁₄	0,05
Azote	N ₂	5,2
Hélium	He	0,15
Dioxyde de carbone	CO ₂	1,19

II.4.2. Masse volumique du gaz naturel

$$\rho = 0,796 \text{ kg/Nm}^3$$

II.4.3. Pouvoir calorifique inférieur (PCI)

$$\text{PCI} = 37770,48 \text{ kJ/kg. [2]}$$

II.4.4. Composition massique du gaz naturel [4]

Le passage de la composition volumique à la composition massique peut se faire à l'aide de la formule suivante:

$$\mu_i = \frac{C_i m_i}{\sum C_i m_i} \quad (\text{II.3})$$

Tableau II.3: Composition massique en (%) du gaz naturel.

Formule chimique	C _i (%)	m _i (g .mol ⁻¹)	C _i m _i	Composition massique (%)
CH ₄	82,52	16	13,20	69,36
C ₂ H ₆	7,92	30	2,37	12,45
C ₃ H ₈	2,06	44	0,90	4,73
C ₄ H ₁₀	0,48	58	0,27	1,41
ISO-C ₄ H ₁₀	0,32	58	0,185	0,97
N-C ₅ H ₁₂	0,11	72	0,079	0,41
C ₆ H ₁₄	0,05	86	0,043	0,225
N ₂	5,2	28	1,456	7,67
He	0,15	4	0,006	0,031
CO ₂	1,19	44	0,523	2,749

II.5. Débit masse de combustible

Le débit –quantité molaire de combustible est défini par: [5]

$$\dot{N}_c = \frac{V_c \times P_c}{R \times T_c} \quad (\text{II.4})$$

V _c [m ³ .s ⁻¹]	P _c [Pa]	T _c [K]	R [J. mol ⁻¹ .K ⁻¹]
0,236	0,5 10 ⁵	294,15	8,314

$$\dot{N}_c = \frac{V_c \times P_c}{R \times T_c}$$

$$\dot{N}_c = \frac{0.236 \times 0.5 \times 10^5}{8.314 \times 294.15}$$

$$\dot{N}_c = 0,00483 \text{ kmol .s}^{-1}$$

La masse molaire de combustible est : [5]

$$M_C = C_{CH_4} \times m_{CH_4} + C_{C_2H_6} \times m_{C_2H_6} + C_{C_3H_8} \times m_{C_3H_8} + C_{C_4H_{10}} \times m_{C_4H_{10}} + C_{C_5H_{12}} \times m_{C_5H_{12}} + C_{C_6H_{14}} \times m_{C_6H_{14}} + C_{N_2} \times m_{N_2} + C_{H_e} \times m_{H_e} + C_{CO_2} \times m_{CO_2} \quad (\text{II.4})$$

$$M_C = 0,8252 \times 16 + 0,0792 \times 30 + 0,0206 \times 44 + 0,008 \times 58 + 0,0011 \times 72 + 0,0005 \times 84 + 0,052 \times 28 + 0,0015 \times 4 + 0,0119 \times 44$$

$$M_C = 19,0564 \text{ kg. kmol}^{-1}$$

Le débit de masse de combustible est donc: [5]

$$\dot{m}_C = \dot{N}_C \times M_C \quad (\text{II.5})$$

$$\dot{m}_C = 0,00483 \times 19,0564$$

$$\dot{m}_C = 0,092 \text{ kg.s}^{-1}$$

II.6. Etude thermochimique de la combustion de gaz naturel

II.6.1. Equations de la combustion

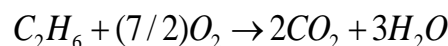
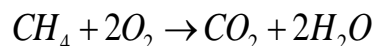
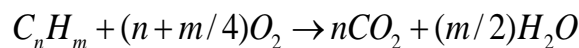
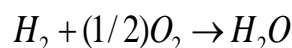
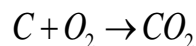
Réaction de combustion est composée de trois éléments essentiels : le carbone (C), l'oxygène (O₂) et l'hydrogène (H).

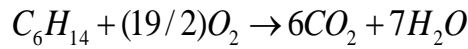
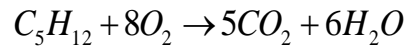
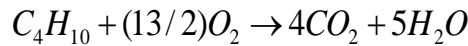
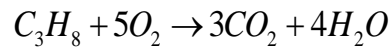
La quantité d'oxygène contenu dans l'air introduit dans la réaction détermine la nature de la combustion.

La combustion peut être complète ou incomplète. On parle de combustion complète lorsqu'il y a une quantité suffisante d'oxygène pour oxyder toutes les particules de combustible. Dans ce cas, tout le carbone du combustible se combine avec l'oxygène pour former du dioxyde de carbone (CO₂), et tout l'hydrogène réagit avec l'oxygène pour former de la vapeur d'eau (H₂O).

En revanche, lorsque la quantité d'oxygène est insuffisante, nous obtenons une combustion incomplète. Une partie du carbone réagit avec l'oxygène pour former du dioxyde de carbone (CO₂), tandis que l'autre partie forme du monoxyde de carbone (CO). [2]

La combustion des hydrocarbures donne lieu, aux équations chimiques de base suivante:





II.6.2. Equation stœchiométrique de la combustion du gaz naturel

Le combustible exige au minimum, pour brûler complètement, la quantité d'oxygène stœchiométrique : [5]

$$N_{O_2 st} = 2C_{CH_4} + 3,5C_{C_2H_6} + 5C_{C_3H_8} + 6,5C_{C_4H_{10}} + 8C_{C_5H_{12}} + 9,5C_{C_6H_{14}} \quad (\text{II.6})$$

$$N_{O_2 st} = 2 \times 0,8252 + 3,5 \times 0,0792 + 5 \times 0,0206 + 6,5 \times 0,008 + 8 \times 0,0011 + 9,5 \times 0,0005$$

$$N_{O_2 st} = 2,0961 \text{ kmol } (O_2) / \text{ kmol } (GN)$$

La quantité d'air stœchiométrique: [5]

$$N_{A st} = \frac{N_{O_2 st}}{0,21} \quad (\text{II.7})$$

$$N_{A st} = \frac{2,0961}{0,21}$$

$$N_{A st} = 9,981 \text{ kmol d'air} / \text{ kmol } (GN)$$

II.6.3. La quantité d'air effective

La quantité d'air effective est donnée par la relation suivante: [5]

$$N_A = \Lambda \frac{N_{O_2 st}}{0,21} \quad (\text{II.8})$$

$$N_A = 1,09 \frac{2,0961}{0,21}$$

$$N_A = 10,88 \text{ kmol d'air} / \text{ kmol } (GN)$$

Masse molaire de l'air : [5]

$$M_a = 0,79m_{N_2} + 0,21m_{O_2} \quad (\text{II.9})$$

$$M_a = (0,79 \times 28) + (0,21 \times 32)$$

$$M_a = 28,84 \text{ kg d'air} / \text{ kmol de combustible.}$$

Débit-masse de l'air est donc: [5]

$$\dot{m}_a = N_A \times M_a \times \dot{N}_C \quad (\text{II.10})$$

$$\dot{m}_a = 10,88 \times 28,84 \times 0,00483$$

$$\dot{m}_a = 1,515 \text{ kg.s}^{-1}$$

II.7. Le débit-masse du gaz de combustion

Le débit masse de gaz de combustion est donnée par le bilan de masse suivant: [6]

$$\dot{m}_f = \dot{m}_C + \dot{m}_a \quad (\text{II.11})$$

$$\dot{m}_f = 0,092 + 1,515$$

$$\dot{m}_f = 1,607 \text{ kg de gaz. s}^{-1}$$

II.8. Rendement de combustion

Le rendement de combustion est une mesure qui détermine l'efficacité avec laquelle un combustible donné est brûlé et converti en énergie introduite.

Se définit par la formule suivant :

$$\eta_{Comb} = \frac{P_i - P_{fum}}{P_i} \quad (\text{II.12})$$

On calcule le rendement de combustion dans le chapitre suivant.

II.9. Conclusion

Nous avons calculé les paramètres les plus importants de la combustion nécessaire ou on a conclu que la combustion étudiée est complète car le volume d'air effectif est supérieur au volume d'air stœchiométrique.

Les résultats trouvés sont essentiel pour l'étude énergétique et exégétique. Cette étude fera l'objet de troisième chapitre.

Chapitre III

**Bilan énergétique et exergetique de la
chaudière MIRA 4000**

III.1. Introduction

La première étape de la conception d'une centrale thermique et d'une chaudière consiste toujours à réaliser des bilans énergétiques. Ces bilans permettent d'établir une corrélation entre la puissance électrique, la puissance thermique, et de déterminer les débits de combustible, d'air, de fumée et de vapeur.

Lorsqu'il s'agit de caractériser les performances d'une chaudière, il est important de faire la distinction entre le rendement de la chaudière lorsque le brûleur est en fonctionnement.

III.2. Bilan énergétique de la chaudière

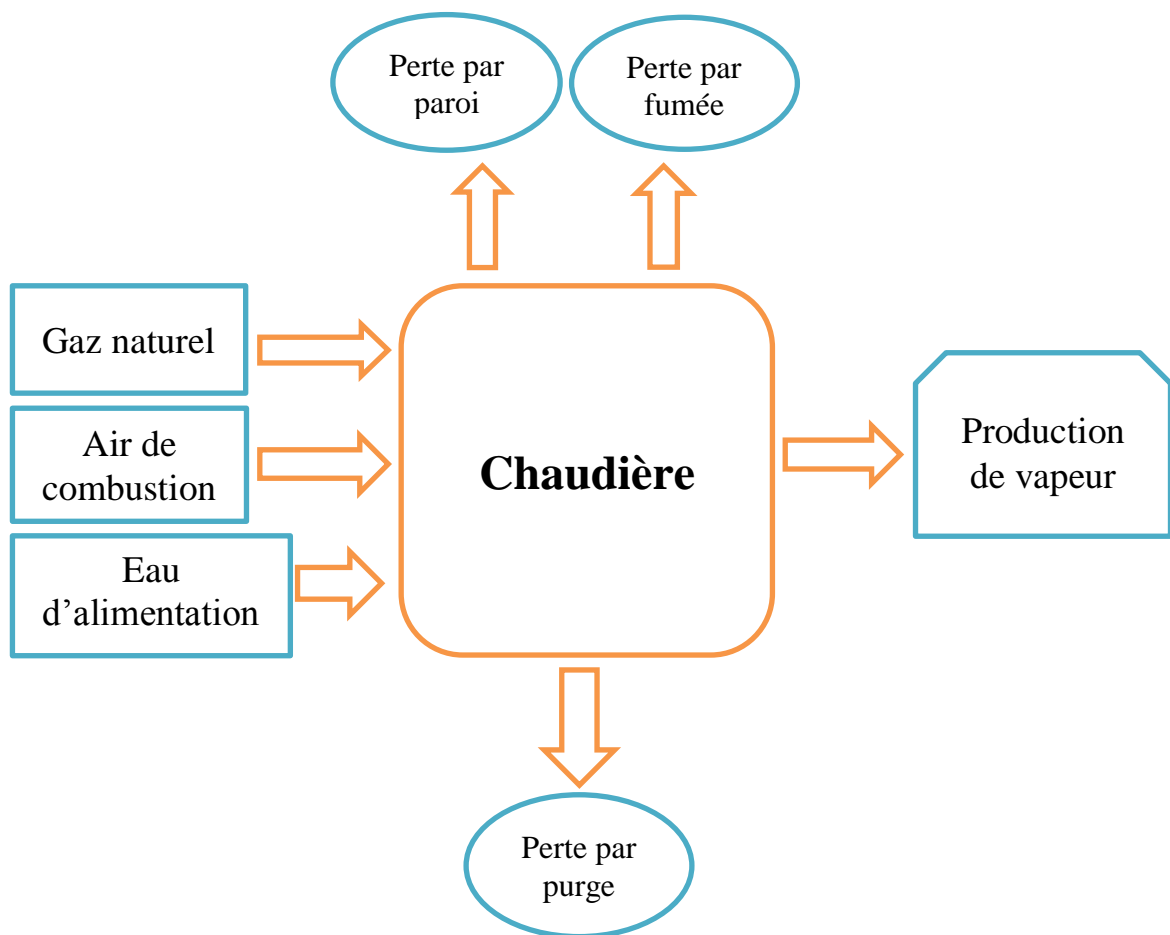


Figure III.1: Bilan énergétique de la chaudière.

A partir de ce schéma on peut écrire :

$$\text{Puissance utile} = \text{puissance introduit} - \sum \text{pertes}$$

III.2.1. La puissance utile

La puissance utile représente la quantité de chaleur transmise au fluide caloporteur par convection et rayonnement par unité de temps, exprimée en kilowatts (kW), selon les conditions d'essai spécifiées par les normes en vigueur.

Lors du passage à travers la chaudière, l'eau entre à l'état liquide puis commence à se vaporiser. Une fois vaporisée, elle subit une surchauffe jusqu'à atteindre la température T_{Surch} , qui correspond à la température de sortie de l'eau de la chaudière.

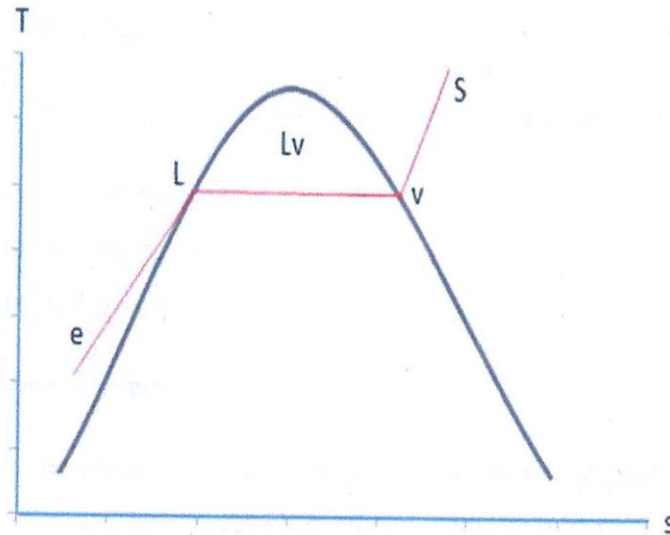


Figure III.2: Diagramme de changement de phase de l'eau.

La formule de la puissance utile est définie par la relation suivante : [7] (III.1)

$$P_u = q_m \cdot [(h_L - h_e) + L_v + (h_s - h_v)]$$

D'après la table thermodynamique [annexes 5 et 6] on obtient les enthalpies dans les différents points:

q_m (kg/s)	h_L	h_e	L_v	h_s	h_v
	(kJ/kg)				
1,11	721,05	101,39	2048,08	2867,01	2769,11

$$P_u = q_m \cdot [(h_L - h_e) + L_v + (h_s - h_v)]$$

$$P_u = 1,11 \times [(721,05 - 101,39) + 2048,08 + (2867,01 - 2769,11)]$$

$$P_u = 3069,86 \text{ kW}$$

III.2.2. La puissance introduite

La puissance introduite dans la chaudière c'est la puissance contenue dans le combustible.

Il s'agit de pouvoir calorifique inférieur de gaz naturel multiplié par son débit massique.

$$PCI_{gaz} = 37770,48 \text{ kJ/kg}$$

Se définit par la relation suivante: [8]

$$P_i = \dot{m}_c \times PCI \quad \text{(III.2)}$$

$$P_i = \dot{m}_c \times PCI.$$

$$P_i = 0,092 \times 37\,770,48$$

$$P_i = 3474,88 \text{ kW}$$

III.2.3. Les pertes globales

Les pertes dans une chaudière correspondent à la différence entre la chaleur totale générée par le combustible et la chaleur effectivement transférée au fluide à chauffer. Ces pertes peuvent être de différentes natures. Parmi les pertes les plus courantes dans une chaudière, on peut distinguer les suivantes :

- Les pertes par fumées
- Les pertes par parois
- Les pertes par purges
- $P_{glob} = \sum Pertes = P_{fum} + P_{par} + P_{purg}$

III.2.3.1. Méthode indirect

III.2.3.1.1. Pertes par fumées

Les pertes par fumées désignent les pertes d'énergie qui se produisent en raison d'une combustion incomplète d'un combustible tel que le gaz naturel. Lorsque le combustible brûle, il génère de la fumée, qui contient des gaz chauds et des particules de suie. Si la combustion n'est pas suffisamment complète, une partie de cette énergie est perdue sous forme de fumée qui est évacuée par la cheminée.

La formule se définit comme: [8]

$$P_{fum} \% = R \frac{T_{fum} - T_{air}}{\%CO_2} \quad \text{(III.3)}$$

$P_{fum} \%$: Les pertes par fumée (%).

T_{fum} : La température des gaz de fumée (K).

T_{air} : La température de l'air ambiante de la chaufferie. (K)

R : Coefficient dépend de la nature de combustible.

(CO₂)% : la teneur des fumées en CO₂.

Tableau III.1: Le coefficient dépend de la nature combustible. [5]

Facteur d'air R	10%	20%	30%
Gaz naturel	0,593	0,582	0,572
GPL	0,53	0,519	0,508
Fiole	0,585	0,565	0,558

Avec l'interpolation:

$$CO_2 = 10,8\% \rightarrow K = 0,592.$$

K	T_{fum} (K)	T_{air} (K)	CO ₂ (%)
0,592	463,15	295,15	10,8

$$P_{fum} \% = R \frac{T_{fum} - T_{air}}{\% CO_2}$$

$$P_{fum} \% = 0,592 \frac{463,15 - 295,15}{10,8}$$

$$P_{fum} \% = 10,01 \%$$

$$P_{fum} = \frac{P_{fum} \% \times P_i}{100}$$

$$P_{fum} = \frac{10,01 \times 3474,88}{100}$$

$$P_{fum} = 347,83 \text{ kW}$$

III.2.3.1.2. Pertes par parois

Ces pertes sont le résultat des échanges de chaleur par convection et rayonnement qui se produisent entre les parois chaudes de la chaudière et l'air ambiant. Elles sont principalement influencées par les dimensions géométriques et la composition des matériaux constituant les parois de la chaudière. Un bon isolant thermique appliqué sur la chaudière permet de réduire considérablement ces pertes.

III.2.3.1.2.1. Pertes par rayonnement

Le rayonnement se réfère à l'émission d'ondes électromagnétiques par un corps chauffé. Il représente les échanges thermiques entre la surface extérieure et l'environnement, et est calculé à l'aide de la formule suivante : [5]

$$P_{ray} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S (T_{par}^4 - T_{air}^4) \quad (\text{III.4})$$

ε	σ (W. m ⁻² .k ⁻⁴)	S (m ²)	T_{par} (K)	T_{air} (K)
0,95	5,6697×10 ⁻⁸	36,03	362,15	295,15

$$P_{ray} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S (T_{par}^4 - T_{air}^4)$$

$$P_{ray} = 0,95 \times 5,6697 \times 36,03 \times (362,15^4 - 295,15^4)$$

$$P_{ray} = 18,65 \text{ kW}$$

III.2.3.1.2.2. Pertes par convection

La convection est le principal mécanisme de transfert d'énergie entre une surface solide et un fluide (liquide ou gaz). La quantité de chaleur transférée par convection entre une paroi solide et un fluide est exprimée par l'équation de Newton: [5]

$$P_{conv} = h \cdot S \cdot (T_{par} - T_{air}) \quad (\text{III.5})$$

Avec :

T_{par} : La température moyenne de la paroi (K).

T_{air} : La température de l'air ambiant (K).

S : Surface totale d'échange (m²)

h : Coefficient d'échange convectif de la chaleur (W.m².K⁻¹)

Nu s'exprime par la relation suivante : [9]

$$N_u = \frac{h \cdot D}{\lambda} \quad (\text{III.6})$$

Donc:

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

N_u : Le nombre de Nusselt définit par : [8]

$$N_u = C.R_a^n \quad \text{(III.7)}$$

Avec:

C et n : Des coefficients de corrélation.

Ra : Nombre de Rayleigh est défini par :

$$R_a = G_r.P_r \quad \text{(III.8)}$$

Le nombre de Prandtl, Pr=0,7303 correspond à la température d'air ambiant dans [Annexe 7].

Gr : Nombre de GrasHof est défini par la Relation :

$$G_r = \frac{\beta.g.\Delta T.D^3}{V^2} \quad \text{(III.9)}$$

Les coefficients de corrélations sont obtenus d'après les relations suivantes : [10]

$$N_u = 1,18 R_a^{0,125} \quad \text{Si} \quad 10^{-3} < R_a < 5 \cdot 10^2$$

$$N_u = 0,54 R_a^{0,25} \quad \text{Si} \quad 5 \cdot 10^2 < R_a < 2 \cdot 10^7$$

$$N_u = 0,13 R_a^{0,33} \quad \text{Si} \quad 2 \cdot 10^7 < R_a < 10^{13}$$

$g(\text{m.s}^{-2})$	ΔT	D (m)	V (m^2/s)	Pr	λ ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}$)
9,81	67	2,25	$1,5344 \cdot 10^{-5}$	0,7303	$2,52 \cdot 10^{-2}$

$$P_{conv} = h.S.(T_{par} - T_{air})$$

$$T_{moy} = \frac{T_{par} + T_{air}}{2} \quad \text{(III.10)}$$

$$T_{moy} = \frac{362,15 + 295,15}{2}$$

$$T_{moy} = 328,82\text{K}$$

$$\beta = \frac{1}{T_{moy}} \quad \text{(III.11)}$$

$$\beta = 3,042 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$$

$$G_r = \frac{\beta.g.\Delta T.D^3}{V^2}$$

$$G_r = \frac{3,042 \times 10^{-3} \times 9,81 \times 67 \times (2,25)^3}{(1,5344 \times 10^{-5})^2}$$

$$G_r = 1,90 \times 10^{10}$$

$$R_a = G_r \cdot Pr$$

$$R_a = 1,90 \times 10^{10} \times 0,7303$$

$$R_a = 1,39 \cdot 10^{10}$$

$$N_u = C \cdot R_a^n$$

Les valeurs de coefficient de corrélation sont obtenues d'après la relation suivante :

$$N_u = 0,13 R_a^{0,33} \quad \text{Si} \quad 2 \cdot 10^7 < R_a < 10^{13}$$

Alors :

$$N_u = 0,13 (1,39 \cdot 10^{10})^{0,33}$$

$$N_u = 289,46$$

Donc :

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

$$h = \frac{289,46 \times 2,52 \times 10^{-2}}{2,25}$$

$$h = 3,23 \cdot 10^{-3} \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

On obtient:

$$P_{conv} = h \cdot S \cdot (T_{par} - T_{air})$$

$$P_{conv} = 3,23 \cdot 10^{-3} \times 36,03 (362,15 - 295,15)$$

$$P_{conv} = 7,80 \text{ kW}$$

Donc :

$$P_{par} = P_{conv} + P_{ray}$$

$$P_{par} = 7,80 + 18,65$$

$$P_{par} = 26,45 \text{ kW}$$

III.2.3.1.3. Pertes par purges

Les pertes sont causées par la chaleur sensible des purges. Elles peuvent être réduites grâce à un traitement approprié de l'alimentation et à un système de retour de condensat efficace. Ces pertes dépendent de la température et du débit des purges.

Les pertes par purge sont estimées de (1 à 5 %). [11]

$$P_{pur} = P_i \frac{y}{100} \quad (\text{III.12})$$

$$P_{pur} = P_i \frac{y}{100}$$

$$P_{pur} = 3474,88 \frac{1}{100}$$

$$P_{pur} = 34,74 \text{ kW}$$

Pertes globale de la chaudière étudiée

Les pertes globales sont:

$$P_{glob} = \sum \text{Pertes} = P_{fum} + P_{par} + P_{purg} \quad (\text{III.13})$$

$$P_{glob} = \sum \text{Pertes} = 347,83 + 26,45 + 34,74$$

$$P_{glob} = \sum \text{Pertes} = 409,02 \text{ kW}$$

III.2.3.2. Méthode direct

La perte globale avec la méthode directe c'est la différence entre la puissance introduit et la puissance utile :

$$P_{glob} = P_i - P_u \quad (\text{III.14})$$

$$P_{glob} = 3474,88 - 3069,86$$

$$P_{glob} = 405,02 \text{ kW}$$

III.2.4. Rendement utile

Le rendement utile d'une chaudière représente son rendement instantané lors du fonctionnement du brûleur. Il correspond au rapport entre la puissance énergétique contenue dans le combustible et la puissance thermique transférée à l'eau de chauffage. Il est défini comme suit:

$$\eta_{utile} = \frac{P_u}{P_i} \quad (\text{III.15})$$

$$\eta_{utile} = \frac{3069,86}{3474,88}$$

$$\eta_{utile} = 0,8834 = 88,34 \%$$

D'une autre manière :

$$\eta_{utile} = 1 - \frac{P_{glob}}{P_i} \quad \text{(III.16)}$$

$$\eta_{utile} = 1 - \frac{405,02}{3474,88}$$

$$\eta_{utile} = 88,34 \%$$

III.2.5. Rendement de la combustion

Le rendement de la combustion est défini par la relation suivante:

$$\eta_{comb} = \frac{P_i - P_{fum}}{P_i}$$

$$\eta_{comb} = \frac{3474,88 - 347,83}{3474,883}$$

$$\eta_{comb} = 0,8999$$

$$\eta_{comb} = 89,99 \% \approx 90 \%$$

Les résultats obtenus sont classés dans le tableau suivant :

Tableau III.2: Tableau récapitulatif des résultats obtenus.

Chaudière	Valeur
Pertes globales avec la méthode indirecte en kW	409,02
Perte globales avec la méthode directe en kW	405,02
Puissance entrante (introduit) en kW	3474,88
Puissance sortante (utile) en kW	3069,86
Rendement utile en %	88,34

III.2.6. Discussion et analyse des résultats

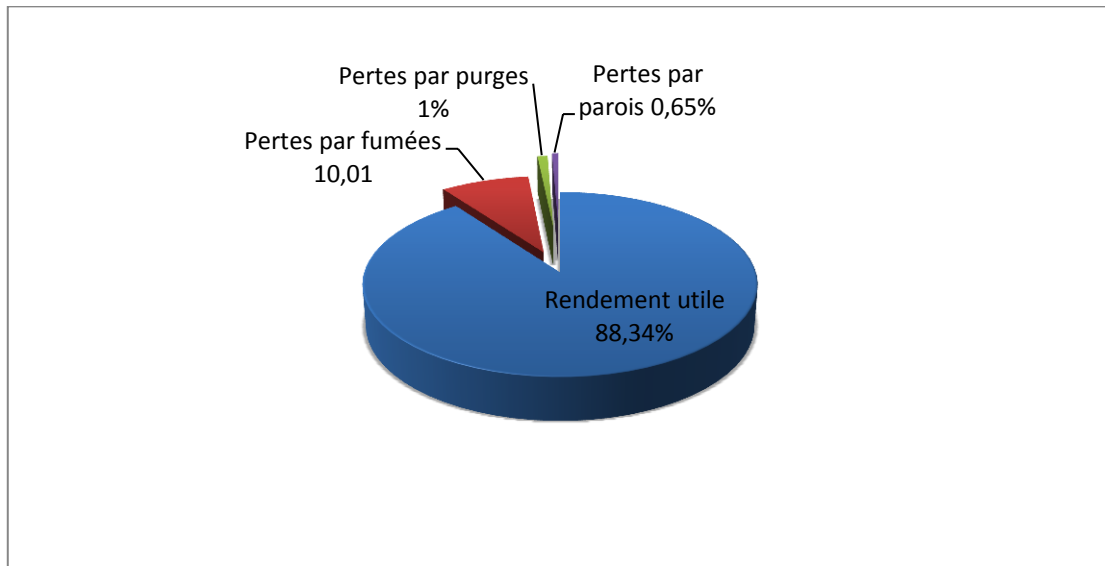


Figure III.3: Le bilan énergétique de la chaudière MIRA 4000.

Discussion

Dans cette figure (IV.3), nous observons que le rendement utile de la chaudière est de 88,34%, ce qui signifie l'énergie contenue dans le combustible est effectivement converti en puissance thermique transmise à l'eau d'alimentation. Cela indique une efficacité relativement élevée de la chaudière dans l'utilisation de l'énergie.

D'autre part, la somme des pertes globales s'élève à 11,66%. Ces pertes représentent la part d'énergie perdue qui n'est pas utilisée de manière productive.

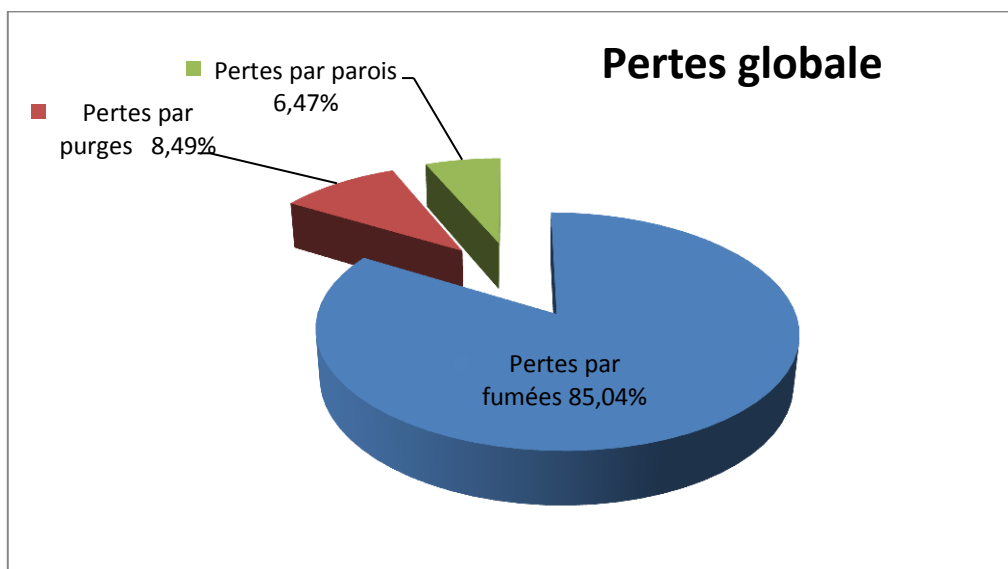


Figure III.4: Les pertes globales.

Discussion

Dans cette figure (IV.4), on observe la répartition des différentes pertes thermiques de la chaudière. On constate que la perte la plus significative est celle due aux fumées, représentant 85,04%. Ensuite, on trouve la perte due aux purges, qui représente 8,49%, et enfin les pertes par les parois, qui correspondent à 6,47%

Discussion générale

D'après nos calculs, nous avons conclu que les pertes par fumée sont plus importantes que les autres pertes, ce qui démontre leur influence significative sur le rendement de la chaudière. Nous avons remarqué que lorsque les pertes par fumée augmentent, le rendement diminue. Ces pertes peuvent être attribuées à plusieurs facteurs, tels que :

- L'augmentation de la chaleur sensible dans les fumées due à un excès d'air dans le brûleur. En effet, cela entraîne une augmentation du volume des fumées, ce qui provoque des pertes supplémentaires à la sortie de la chaudière.
- L'encrassement de la chaudière.
- Des problèmes d'entretien, tels qu'une mauvaise distribution de l'air.

La température des fumées est très élevée, cette augmentation provoque une diminution de rendement de la chaudière

Le calorifugeage des parois de la chaudière permet de conserver l'énergie thermique, tandis qu'un traitement approprié de l'alimentation et un système de retour de condensat efficace réduisent les pertes par purge. Cela explique pourquoi les pertes par parois et par purge sont presque négligeables.

III. 3. Bilan exergetique de la chaudière

III.3.1. Introduction

La théorie de l'exergie offre un cadre rigoureux permettant de quantifier la qualité thermodynamique d'un système, qu'il soit ouvert ou fermé, en régime dynamique ou non.

Elle est de plus en plus reconnue comme l'outil privilégié pour la comparaison et l'optimisation des cycles thermodynamiques grâce aux bilans exergetique. Contrairement au premier principe, la théorie de l'exergie prend en compte à la fois les quantités d'énergie impliquées et leur qualité, permettant ainsi une analyse plus approfondie.

Les bilans exergetique présentent un intérêt majeur en permettant d'étudier la répartition des irréversibilités au sein d'un système, mettant en évidence la contribution relative de chaque composant aux pertes globales. La valeur précise des exergies impliquées a donc généralement une importance limitée. Cela justifie la tolérance envers certaines

imprécisions dans leur évaluation, ce qui peut poser diverses difficultés méthodologiques, comme nous l'explorerons ultérieurement.

Le bilan exergetique de la chaudière est exprimé par la formule suivant : [5]

$$\dot{E}_{wc}^+ = \dot{E}_{we}^- + \dot{L} \quad (\text{III.17})$$

Avec :

\dot{E}_{we}^- : Copuissance - transformation du réseau d'eau.

\dot{E}_{wc}^+ : Copuissance - transformation reçue par la chaudière.

\dot{L} : Perte exergetique totale dans la chaudière.

III.3.2. Copuissance - transformation du réseau d'eau

La copuissance-transformation reçue par l'eau dans la chaudière est donnée par la relation suivante : [5]

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_e \times (k_2 - k_1) \quad (\text{III.18})$$

Calcul des coenthalpies (k_2 et k_1) de l'eau à l'entrée et à la sortie de la chaudière :

$$k_1 = h_1 - T_a \times S_1 \quad (\text{III.19})$$

D'après la table thermodynamique numérique :

$h_1 = h_e$ (kJ/kg)	T_a (K)	$S_1 = S_e$ (kJ/kg .K)
101,39	295,15	0,35298

$$k_1 = h_e - T_a \times S_e$$

$$k_1 = 101,39 - (295,15 \times 0,35298)$$

$$k_1 = |-2,79| \text{ kJ/kg}$$

Calcul de k_2 :

$$k_2 = h_2 - T_a \times S_2 \quad (\text{III.20})$$

D'après la table thermodynamique numérique :

$h_2 = h_s$ (kJ/kg)	T_a (K)	$S_2 = S_s$ (kJ/kg .K)
2867,01	295,15	7,93893

$$k_2 = h_s - T_a \times S_s$$

$$k_2 = 2867,01 - (295,15 \times 7,93893)$$

$$k_2 = 523,83 \text{ kJ/kg}$$

D'où :

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_e \times (k_2 - k_1) \quad (\text{III.21})$$

$$\dot{E}_{we}^- = 1,11 \times (523,83 - (-2,79))$$

$$\dot{E}_{we}^- = 584,54 \text{ kW}$$

III.3.3. Copuissance - transformation reçue par la chaudière

La copuissance transformation reçue par la chaudière est donnée par la relation suivante: [5]

$$E_{wc}^+ = \dot{m}_C \times \Delta k_{oc} \quad (\text{III.22})$$

Δk_{oc} = pouvoir exergetique du combustible.

$$\Delta k_{oc} = \sum (C_i \times \Delta k_{oi}) \quad (\text{III.23})$$

$$\Delta k_{oc} = C_{CH_4} \times \Delta k_{CH_4} + C_{C_2H_6} \times \Delta k_{C_2H_6} + C_{C_3H_8} \times \Delta k_{C_3H_8} + C_{C_4H_{10}} \times \Delta k_{C_4H_{10}} + C_{C_5H_{12}} \times \Delta k_{C_5H_{12}} + C_{C_6H_{14}} \times \Delta k_{C_6H_{14}}$$

$$\Delta k_{oc} = 0,8252 \times 829800 + 0,0792 \times 1493200 + 0,0206 \times 2148000 + 0,008 \times 2801200$$

$$+ 0,0011 \times 3454100 + 0,0005 \times 4117500$$

$$\Delta k_{oc} = 875529,06 \text{ kJ/kmol}$$

$$M_C = 19,0564 \text{ kg.kmol}^{-1}$$

$$\Delta k_{oc} = \frac{875529,06}{19,0564}$$

$$\Delta k_{oc} = 45944,09 \text{ kJ/kg}$$

D'où :

$$\dot{E}_{wc}^+ = \dot{m}_C \times \Delta k_{oc}$$

$$\dot{E}_{wc}^+ = 0,092 \times 45944,09$$

$$\dot{E}_{wc}^+ = 4226,85 \text{ kW}$$

III.3.4. Perte exergetique totale dans la chaudière

La perte exergetique \dot{L} est la diminution de la possibilité d'obtention de travail, due aux irréversibilités internes du système. Comme étant égale à la différence entre le travail maximum possible et le travail réel fourni, se définit par la formule suivante : [5]

$$\dot{L} = \dot{E}_{wc}^+ - \dot{E}_{we}^- \quad (\text{III.24})$$

$$\dot{L} = 4226,85 - 584,54$$

$$\dot{L} = 3642,31 \text{ kW}$$

III.3.5. Rendement exergetique de la chaudière

Contrairement au bilan énergétique exprimant la conservation de l'énergie, le bilan exergetique met bien en évidence la notion de perte thermodynamique. Il permet donc de définir la notion de rendement d'une façon claire et logique. [12]

$$\eta = \frac{\dot{E}_{we}^-}{\dot{E}_{wc}^+} \quad (\text{III.25})$$

$$\eta = \frac{584,54}{4226,85} \times 100$$

$$\eta = 13,83 \%$$

Ou bien :

$$\eta = 1 - \frac{\dot{L}}{\dot{E}_{wc}^+} \quad (\text{III.26})$$

$$\eta = 1 - \frac{3642,31}{4226,85}$$

$$\eta = 13,83 \%$$

III.4. Conclusion

D'après les résultats de l'analyse exergetique effectuée sur la chaudière à vapeur MIRA 4000, il est observé que les pertes exergetique dans la chaudière représentent près de 86 % de la copuissance-transformation reçue par la chaudière. Ces pertes sont principalement attribuables aux facteurs suivants :

- Les pertes exergetiques causées par les irréversibilités lors des réactions chimiques.
- Les pertes exergetiques dues à la dissipation dans les réseaux de combustion et d'eau.
- Les pertes exergetiques résultent de la diffusion du panache dans l'atmosphère.
- Les pertes exergetiques provoquées par la déperdition par convection et rayonnement.

Le rendement exergetique est inférieur au rendement énergétique. Le rendement exergetique représente en réalité le rendement réel de la chaudière.

Chapitre IV

**Etude d'un économiseur de chaleur pour
la chaudière MIRA 4000**

IV.1. Introduction

Lors des calculs précédents, la chaleur issue de fonctionnement d'une chaudière est rejetée dans l'air ambiant via les fumées (10%). Celle-ci encore ardentes, représentent dès lors une source d'énergie perdue. Il est pourtant possible de valoriser la chaleur produite par la chaudière en installant, sur le système d'évacuation des fumées, un économiseur de chaleur conçu pour récupérer cette chaleur perdue et l'employer pour préchauffer l'eau d'alimentation de la chaudière.

IV.2. Définition

Un économiseur est un dispositif d'échange de chaleur à multiples passages qui est installé sur le circuit des fumées entre la chaudière et la cheminée. Son rôle principal est de récupérer la chaleur perdue par les fumées en chauffant l'eau d'alimentation avant qu'elle n'entre dans la chaudière. L'économiseur est généralement composé d'une batterie munis d'ailettes afin d'augmenter le coefficient d'échange ou de tubes lisses pour faciliter les échanges thermiques.



Figure IV.1: Economiseur vue de l'intérieur

IV.3. Les types des économiseurs

Tableau IV.1 : Les différents types des économiseurs.

Type d'économiseur	Économiseur de gaz d'échappement monté dans le tiroir de la boîte arrière de la chaudière	Économiseur monté dans un boîtier sur la sortie de fumée	Économiseur de gaz d'échappement et échangeur d'eau d'alimentation	Économiseur de gaz d'échappement plus échangeur de fumées/eau/air de combustion
Conditions d'application	Gaz naturel seulement	Gaz naturel / Gasoil, Pour applications mixtes	Utilisé en conjonction avec un dégazeur thermique et lorsqu'il y a une source de froid, de l'eau traitée à l'arrivée et un taux de retour du condensat à 50 %.	Procédé avec 85 à 90% de retour de condensat et un débit de vapeur supérieur à 15 t/h
Gain de rendement	4 à 5%	5 à 6%	5 à 6%	En fonction des conditions d'utilisation

IV.4. Principe de fonctionnement d'un économiseur

Les gaz de combustion produits par une chaudière à vapeur, de même que pour les chaudières à eau chaude ou à eau surchauffée, constituent la principale source de perte d'énergie.

Un économiseur est installé en aval de la chaudière, sur le circuit des gaz de combustion entre la chaudière et la cheminée. Son objectif est de récupérer une partie de la chaleur présente dans les gaz de combustion pour préchauffer l'eau d'alimentation de la chaudière.

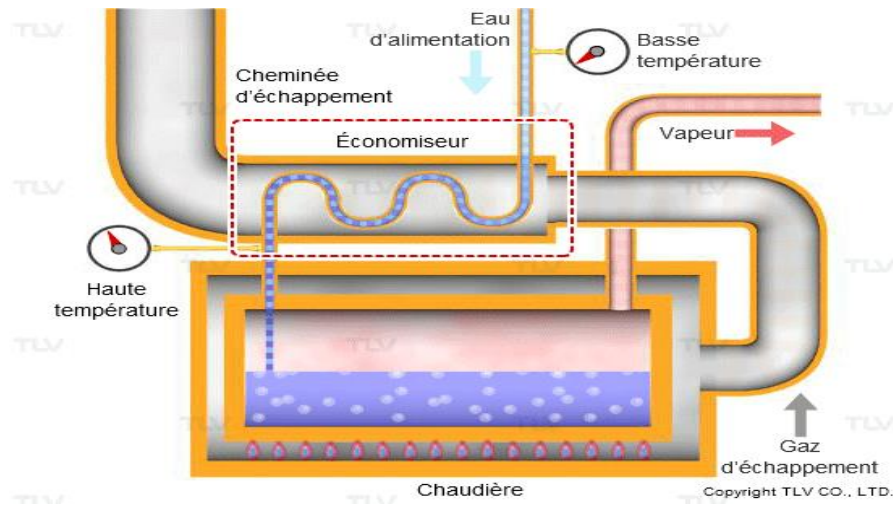


Figure IV.2 : Principe de fonctionnement d'un économiseur.

IV.5. Economiseur proposée

Economiseur Babcock Wanson monté dans le tiroir de la boîte arrière de la chaudière conçue pour fonctionner avec des alimentations en gaz naturel fixes. Le gain sur le rendement est de 4 à 5 %.



Figure IV.3 : Economiseur Babcock Wanson.

IV.6. Avantage d'un économiseur de chaleur

- L'entreprise maîtrise sa consommation d'énergie et réaliser des économies d'énergies.
- Réduction de taux de CO₂.
- Récupère la chaleur émanant des fumées.
- Réduction la température des fumées.
- Augmentation de rendement de la chaudière.
- Réduire l'impact environnemental de son activité.
- Baisse des couts de production et de maintenance.
- Durée de vie des appareils.

IV.7. Application à la chaudière MIRA 4000

Les gaz de combustion émis par la chaudière contiennent une quantité considérable d'énergie. L'économiseur proposé exploite cette énergie potentielle en préchauffant l'eau d'alimentation, ce qui permet d'augmenter les performances de la chaudière de 4 à 5 % et de réduire la consommation d'énergie. L'économiseur est directement intégré dans la conduite des gaz de fumée situe derrière la chaudière et il est connecté à la conduite de refoulement de l'eau d'alimentation pour préchauffer celle-ci, pour réduire les pertes de fumées et obtenir un rendement maximale.

L'eau d'alimentation de la chaudière à vapeur subit un traitement chimique et thermique avant d'être administré dans l'économiseur à une température de 24°C. Ce dernier refroidit le flux de gaz de combustion tout en réchauffant l'eau. La température des gaz de fumées est ainsi réduite de 190°C à 100°C.

On va suivre la même démarche de cette référence [14] pour l'application sur la chaudière MIRA 4000.

IV.8. Flux de chaleur échangé

Application sur les gaz parfait :

$$\phi = q_m (H_2 - H_1) = q_m C_p (T_2 - T_1) \quad (\text{IV.1})$$

$$\phi = \dot{m}_f (H_{f.e} - H_{f.s}) = \dot{m}_f C_{p.f} (T_{f.e} - T_{f.s})$$

$$\phi = \dot{m}_e (H_{e.s} - H_{e.e}) = \dot{m}_e C_{p.e} (T_{e.s} - T_{e.e})$$

$$\phi = \dot{m}_f C_{p.f} (T_{f.e} - T_{f.s}) = \dot{m}_e (H_{e.s} - H_{e.e})$$

$$H_{e.s} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_e} C_{p.f} (T_{f.e} - T_{f.s}) + H_{e.e}$$

D'après la table thermodynamique numérique [Annexe 5] :

$$H_{e.e} (T=297.15\text{K}) = 101,39 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Détermination de $C_{p.f}$

$$C_{p.f} = \sum Y_i \cdot C_{p,i} \quad (\text{IV.2})$$

$C_{p.f}$: Chaleur spécifique des fumées [kJ/kg].

Y_i : Fraction massique de chaque produit de la combustion.

$C_{p,i}$: Chaleur spécifique de chaque produit de la combustion [kJ/kg .K].

Tel que :

$$Y_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_f} \quad (\text{IV.3})$$

$$\dot{m}_f = \dot{m}_c + \dot{m}_a \quad (\text{IV.4})$$

\dot{m}_i : Débit massique du produit i.

\dot{m}_f : Débit massique total des fumées.

Calcul de débit massique des produits de combustion: [5]

$$\dot{m}_{O_2} = [(0,21 \times N_A) - N_{O_2} st] \times \dot{N}_C \quad (\text{IV.5})$$

$$\dot{m}_{O_2} = 32 [(0,21 \times 10,88) - 2.0961] \times 0,00483$$

$$\dot{m}_{O_2} = 0,0291 \text{ kg } (O_2)/s$$

$$\dot{m}_{N_2} = 28 \cdot [(0,79 \times N_A) + C_{N_2}] \times \dot{N}_C \quad (\text{IV.6})$$

$$\dot{m}_{N_2} = 28 [(0,79 \times 10,88) + 0,052] \times 0,00483$$

$$\dot{m}_{N_2} = 1,1694 \text{ kg } (N_2)/\text{s}$$

$$\dot{m}_{CO_2} = 44(C_{CH_4} + 2C_{C_2H_6} + 3C_{C_3H_8} + 4C_{C_4H_{10}} + 5C_{C_5H_{12}} + 6C_{C_6H_{14}}) \times \dot{N}_C \quad (\text{IV.7})$$

$$\dot{m}_{CO_2} = 44(0,8252 + 2 \times 0,0792 + 3 \times 0,006 + 4 \times 0,008 + 5 \times 0,0011 + 6 \times 0,005) \times 0,00483$$

$$\dot{m}_{CO_2} = 0,2365 \text{ kg } (CO_2)/\text{s}$$

$$\dot{m}_{H_2O} = 18(2C_{CH_4} + 3C_{C_2H_6} + 4C_{C_3H_8} + 5C_{C_4H_{10}} + 6C_{C_5H_{12}} + 7C_{C_6H_{14}}) \times \dot{N}_C \quad (\text{IV.8})$$

$$\dot{m}_{H_2O} = 18 (2 \times 0,8252 + 3 \times 0,0792 + 4 \times 0,0206 + 5 \times 0,008 + 6 \times 0,0011 + 7 \times 0,005) \times 0,00483$$

$$\dot{m}_{H_2O} = 0,1721 \text{ kg } (H_2O)/\text{s}$$

Résultat

Tableau IV.2: Composition des fumées.

Produits	O_2	N_2	CO_2	H_2O	\dot{m}_f
\dot{m}_i (kg/s)	0,0291	1,1694	0,2365	0,1721	1,607
Y_i	0,0181	0,7277	0,1471	0,107	1

La chaleur spécifique des fumées est donc :

$$C_{p,f} = 0,7277C_{P(N_2)} + 0,107C_{P(H_2O)} + 0,1471C_{P(CO_2)} + 0,0181C_{P(O_2)} \quad (\text{IV.9})$$

IV.8.1. Calcul de la chaleur spécifique de chaque produit de la combustion à l'entrée de l'économiseur

D'après les [annexes 1, 2, 3, 4] :

Pour une température $T = 463,15 \text{ K}$

Avec la formule de l'interpolation:

$$C_{p(i)}T_f = C_{p(i)}(T_A) + (C_{p(i)}(T_B) - C_{p(i)}(T_A)) \times \left[\frac{T_B - T_A}{T_{f,e} - T_A} \right] \quad (\text{IV.10})$$

-Calcul chaleur spécifique de l'azote $C_{P(N_2)}$

$$C_{p(N_2)}T_{(450K)} = 1,049 \text{ kJ /kg}$$

$$C_{p(N_2)}T_{(500K)} = 1,056 \text{ kJ /kg}$$

Par interpolation :

$$C_{p(N_2)}T_{(463,15)} = 1,050 \text{ kJ/kg}$$

-Calcul chaleur spécifique d'eau $C_{p(H_2O)}$

$$C_{p(H_2O)}T_{(450K)} = 1,926 \text{ kJ/kg}$$

$$C_{p(H_2O)}T_{(500K)} = 1,954 \text{ kJ/kg}$$

Par interpolation :

$$C_{p(H_2O)} T_{(463,15 \text{ K})} = 1,933 \text{ kJ/kg}$$

-Calcul chaleur spécifique de dioxyde de carbone $C_{p(CO_2)}$

$$C_{p(CO_2)}T_{(450K)} = 0,978 \text{ kJ /kg}$$

$$C_{p(CO_2)}T_{(500K)} = 1,014 \text{ kJ/kg}$$

Par interpolation :

$$C_{p(CO_2)}T_{(463,15K)} = 0,987 \text{ kJ/kg}$$

-Calcul chaleur spécifique de l'oxygène $C_{p(O_2)}$

$$C_{p(O_2)}T_{(450K)} = 0,956 \text{ kJ/kg}$$

$$C_{p(O_2)}T_{(500K)} = 0,972 \text{ kJ /kg}$$

Par interpolation :

$$C_{p(O_2)} T_{(463,15 \text{ k})} = 0,960 \text{ kJ/kg}$$

$$C_{p.f} = 0,7277C_{p(N_2)} + 0,107C_{p(H_2O)} + 0,1471C_{p(CO_2)} + 0,0181C_{p(O_2)}$$

$$C_{p.f} T_{(463,15K)} = 0,7277 \times 1,050 + 0,107 \times 1,933 + 0,1471 \times 0,987 + 0,0181 \times 0,960$$

$$C_{p.f} T_{(463,15K)} = 1,1334 \text{ kJ/kg. K}$$

IV.8.2. Calcul de la chaleur spécifique de chaque produit de la combustion à la sortie l'économiseur

Pour une température $T = 373,15 \text{ K}$

Avec la formule de l'interpolation:

$$C_{p(i)} T_f = C_{p(i)}(T_A) + (C_{p(i)}(T_B) - C_{p(i)}(T_A)) \times \left[\frac{T_B - T_A}{T_{f.s} - T_A} \right]$$

-Calcul chaleur spécifique de l'azote $C_{p(N_2)}$

$$C_{p(N_2)} T_{(350K)} = 1,041 \text{ kJ/kg}$$

$$C_{p(N_2)} T_{(375K)} = 1,042 \text{ kJ/kg}$$

Par interpolation :

$$C_{p(N_2)} T_{(373,15K)} = 1,0419 \text{ kJ/kg}$$

-Calcul chaleur spécifique d'eau $C_{p(H_2O)}$

$$C_{p(H_2O)} T_{(350K)} = 1,880 \text{ kJ/kg}$$

$$C_{p(H_2O)} T_{(375K)} = 1,890 \text{ kJ/kg}$$

Par interpolation :

$$C_{p(H_2O)} T_{(373,15K)} = 1,889 \text{ kJ/kg}$$

-Calcul chaleur spécifique de dioxyde de carbone $C_{p(CO_2)}$

$$C_{p(CO_2)} T_{(350K)} = 0,895 \text{ kJ/kg}$$

$$C_{p(CO_2)} T_{(375K)} = 0,918 \text{ kJ/kg}$$

Par interpolation :

$$C_{p(CO_2)} T_{(373,15K)} = 0,9163 \text{ kJ/kg}$$

-Calcul chaleur spécifique de l'oxygène $C_{p(O_2)}$

$$C_{p(O_2)} T_{(350K)} = 0,928 \text{ kJ/kg}$$

$$C_{p(O_2)} T_{(375K)} = 0,934 \text{ kJ/kg}$$

Par interpolation :

$$C_{p(O_2)} T_{(373,15)} = 0,933 \text{ kJ/kg}$$

$$C_{p.f} = 0,7277C_{p(N_2)} + 0,107C_{p(H_2O)} + 0,1471C_{p(CO_2)} + 0,0181C_{p(O_2)}$$

$$C_{p.f} T_{(373,15K)} = 0,7277 \times 1,0419 + 0,107 \times 1,889 + 0,1471 \times 0,9163 + 0,0181 \times 0,933$$

$$C_{p.f} T_{(373,15K)} = 1,112 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

IV.8.3. Calcul de la chaleur spécifique moyenne des fumées entre l'entrée et la sortie de l'économiseur

$$C_{p.f(M)} = \frac{C_{p.f} \cdot T_{(463,15K)} + C_{p.f} \cdot T_{(373,15K)}}{2}$$

(IV.11)

$$C_{p.f(M)} = \frac{1,1334 + 1,122}{2}$$

$$C_{p.f(M)} = 1,1227 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

Analyse numérique:

$$H_{e.s} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_e} C_{p.f} (T_{f.e} - T_{f.s}) + H_{e.e} \quad \text{(IV.12)}$$

$$H_{e.s} = \frac{1,607}{1,11} \times 1,1227 (463,15 - 373,15) + 101,39$$

$$H_{e.s} = 247,67 \text{ kJ/kg}$$

D'après la table thermodynamique numérique:

$$T_{e.s} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

Calcul la chaleur récupérée par l'économiseur: [13]

$$\phi = \dot{m}_f C_{p.f} (T_{f.e} - T_{f.s}) \quad \text{(IV.13)}$$

AN :

$$\phi = 1,607 \times 1,1227 (463,15 - 373,15)$$

$$\phi = 162,37 \text{ kW}$$

IV.9. Discussion sur les résultats :

D'après notre calcul, dans le chapitre VI, on a trouvé que les pertes évacuées par les fumées est 347,83 kW ce représente 10% de perte, mais avec l'installation de l'économiseur de chaleur, le flux récupéré est de 162,37 kW. Alors on voit que l'économiseur à récupérer une moitié de la chaleur perdue 50%. Aussi l'eau d'alimentation il été de 24 °C, il est chauffée jusqu'à 60 °C.

Tableau IV.3: tableau récapitulatif des résultats obtenus.

Température à l'entrée des gaz de fumée	C°	190
Température à sortie des gaz de fumée	C°	100
Température à l'entrée d'eau	C°	24
Température à sortie d'eau	C°	60
Débit d'eaux	kg/ s	1,11
Débit des gaz de fumée	kg/ s	1,607
CP des gaz de fumée	kJ/kg. K	1,1227

Le rendement de la chaudière après l'amélioration

Les pertes par les fumées sont réduites :

$$P_{fum} = 347,83 - 162,37$$

$$P_{fum} = 185,46 \text{ kW}$$

Le nouveau rendement de la combustion :

$$\eta_{Comb} = \frac{P_i - P_{fum}}{P_i}$$

$$\eta_{Comb} = \frac{3474,83 - 185,46}{3474,83}$$

$$\eta_{Comb} = 94,66 \%$$

Le nouveau rendement de la chaudière:

$$\Sigma \text{pertes} = 185,46 + 26,45 + 37,74$$

$$\Sigma \text{pertes} = 246,65 \text{ kW}$$

$$\eta_{utile} = 1 - \frac{P_{glob}}{P_i}$$

$$\eta_{utile} = 1 - \frac{246,65}{3474,83}$$

$$\eta_{utile} = 92,90 \%$$

Alors on conclut que l'économiseur Babcock Wanson permet d'augmenter les performances de la chaudière de 4 à 5 %.

IV.10. Conclusion

Suite au calcul de la chaleur récupérée par l'eau, il est clair que l'installation d'un économiseur de chaleur pour la chaudière MIRA 4000 est un investissement très rentable. En effet, cela permet de réaliser des économies de combustibles significatives, car la quantité d'énergie récupérable représente plus de 50 % de la chaleur qui serait autrement dispersée dans les fumées sans être utilisée. De plus, cette énergie récupérée peut également être utilisée pour le préchauffage du combustible ou de l'air, offrant ainsi des capacités supplémentaires d'optimisation et d'économie d'énergie.



Conclusion générale

Conclusion générale

Le stage que nous avons effectué au sein du complexe Bejaia Emballage «BEJE » nous a permis de mettre en pratique les connaissances acquises lors de notre formation en installation énergétique et turbomachine à l'université de Bejaia. Notre projet de fin d'études s'est inscrit dans la problématique de la maîtrise des pertes d'énergie au niveau de la chaudière à vapeur.

Ce sujet de recherche s'est avéré très rentable, car il nous a permis de comprendre le mécanisme de la combustion, d'évaluer les performances énergétiques de la chaudière MIRA 4000 D'ECFERAL en calculant son rendement et en identifiant les pertes générées lors de la production de vapeur. Nous avons ainsi pu proposer des actions et des perspectives pour améliorer ces performances.

De plus, notre étude nous a permis de réaliser un bilan exergétique, un outil de travail extrêmement pratique qui permet de mettre en évidence la qualité thermodynamique de tout système, qu'il s'agisse d'un élément, d'un appareil, d'une machine ou d'une installation. Cela nous a permis de dresser un véritable diagnostic de l'état thermodynamique du système étudié.

Nos conclusions indiquent que les pertes par les fumées sont plus importantes que les autres pertes et jouent un rôle majeur dans l'influence du rendement de la chaudière. Nous avons donc proposé l'utilisation d'un économiseur de chaleur pour réduire cette perte considérable et améliorer le rendement.

Cette étude nous a montré qu'il est toujours possible d'apporter des améliorations à des installations existantes, même celles qui sont performantes. Dans ce contexte, nous suggérons les améliorations suivantes :

- Utilisation d'un isolant thermique de qualité.
- Réalisation d'études expérimentales et théoriques sur l'excès d'air optimal dans la chaudière.
- Réalisation d'analyses régulières.
- Amélioration du système de traitement de l'eau d'alimentation.
- Réduction des pertes énergétiques et exergétique par la cheminée en récupérant la chaleur des gaz d'échappement pour préchauffer l'eau d'alimentation, tout en maintenant une température supérieure à la limite de condensation, comme indiqué dans le dernier chapitre.
- Respect du plan de maintenance préventive pour les équipements.

En conclusion, il est important de souligner que s'engager en faveur d'un développement durable nécessite un investissement. Il est primordial d'être conscient que l'amélioration du rendement d'une chaudière permet de réduire la consommation de combustible, de réduire les émissions de CO₂ et de CO dans l'atmosphère.

En résumé, il est essentiel de produire tout en respectant l'environnement, en protégeant les appareils et en économisant de l'énergie.



Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Catalogue de la chaudière d'ECFERAL MYRA Bejaia Emballage.
- [2] CHABI. A, MEKZINE. L, «Etude thermique d'une chaudière à vapeur 4 Tonnes/Heure de l'ECFERAL», Master en Génie Mécanique, Université Mouloud Mammeri, 2014.
- [3] NEDJIB BOUJNAH, « GUIDE CHAUDIERES », PARTNERS-KDA-Rév, 2008.
- [4] « Optimisation du facteur énergétique par l'amélioration système de production d'énergie ».
- [5] Borel. L, «Thermodynamique et énergétique », Volume2-, Presses Polytechnique et Universitaire, Romandes, 2008.
- [6] Christophe. A, « Chaudières à vapeur à combustible ». Enseignant de BTS CIRA Lycée Pilot Innovant, Edition du 2007.
- [7] Borel. L, «Thermodynamique et énergétique », Volume1-, Presses Polytechnique et Universitaire, Romandes, 2008.
- [8] RIAD.A « Optimisation énergétique des deux chaudières auxiliaire à la centrale thermoélectrique », Mémoire de Master Science Technologie Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, 2012.
- [9] Padet. J, Echangeurs de chaleur-Méthode globales de calcul avec 11 problèmes résolus, Reims, 1994.
- [10] Marty. PH, « Transfer thermiques convectifs », Master 2 en Génie des procédés, Université Grenoble, 2012.
- [11] David. R, «Développement de Piles à Combustion de Type SOFC, Conventionnelles et Mono-Chambres, en Technologie Planaire par Sérigraphie », Thèse Doctorat, l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Génie des Procèdes, 2005.
- [12] BEDJOU. M, « Analyse énergétique et exergétique de la centrale à cogénération-CEVITAL- Bejaia ». Université A/ Mira de Bejaia, 2014.
- [13] Cheridi. A. L, «Etude Numérique de transitoire accidentel d'une chaudière industrielle par le code Relap5/Mod3.2 », Université Constantine 1, 2013
- [14] Ait Yahia. A, Belkhadra .A, « Bilan énergétique de la chaudière ECFERAL-IRIS-Sétif » Master en Génie Mécanique, Université A/Mira de Bejaia, 2019



Annexes

Nitrogen Gas - N₂

Temperature · T · (K)	Specific Heat - C _p - (kJ/kgK)
175	1.039
200	1.039
225	1.039
250	1.039
275	1.039
300	1.040
325	1.040
350	1.041
375	1.042
400	1.044
450	1.049
500	1.056
550	1.065
600	1.075
650	1.086
700	1.098
750	1.110
800	1.122
850	1.134
900	1.146
950	1.157
1000	1.167
1050	1.177
1100	1.187
1150	1.196
1200	1.204
1250	1.212
1300	1.219
1350	1.226
1400	1.232
1500	1.244
1600	1.254
1700	1.263
1800	1.271
1900	1.278
2000	1.284
2100	1.290
2200	1.295

Annexe 1: Chaleur spécifique de l'azote.

Water Vapor - H_2O

Temperature - T - (K)	Specific Heat - c_p - (kJ/kg K)
175	1 850
200	1 851
225	1 852
250	1 855
275	1 859
300	1 864
325	1 871
350	1 880
375	1 890
400	1 901
450	1 926
500	1 954
550	1 984
600	2 015
650	2 047
700	2 080
750	2 113
800	2 147
850	2 182
900	2 217
950	2 252
1000	2 288
1050	2 323
1100	2 358
1150	2 392
1200	2 425
1250	2 458
1300	2 490
1350	2 521
1400	2 552
1500	2 609
1600	2 662
1700	2 711
1800	2 756
1900	2 798
2000	2 836
2100	2 872
2200	2 904

Annexe 2: Chaleur spécifique de la vapeur d'eau.

Carbon Dioxide Gas - CO₂

Temperature - T - (K)	Specific Heat - c _p - (kJ/kgK)
175	0.709
200	0.735
225	0.763
250	0.791
275	0.819
300	0.846
325	0.871
350	0.895
375	0.918
400	0.939
450	0.978
500	1.014
550	1.046
600	1.075
650	1.102
700	1.126
750	1.148
800	1.168
850	1.187
900	1.204
950	1.220
1000	1.234
1050	1.247
1100	1.259
1150	1.270
1200	1.280
1250	1.290
1300	1.298
1350	1.306
1400	1.313
1500	1.326
1600	1.338
1700	1.348
1800	1.356
1900	1.364
2000	1.371
2100	1.377
2200	1.383

Annexe 3: Chaleur spécifique du dioxyde de carbone.

Oxygen Gas - O₂

Temperature - T - (K)	Specific Heat - c _p - (kJ/kg K)
175	0.910
200	0.910
225	0.911
250	0.913
275	0.915
300	0.918
325	0.923
350	0.928
375	0.934
400	0.941
450	0.956
500	0.972
550	0.988
600	1.003
650	1.017
700	1.031
750	1.043
800	1.054
850	1.065
900	1.074
950	1.082
1000	1.090
1050	1.097
1100	1.103
1150	1.109
1200	1.115
1250	1.120
1300	1.125
1350	1.130
1400	1.134
1500	1.143
1600	1.151
1700	1.158
1800	1.166
1900	1.173
2000	1.181
2100	1.188
2200	1.195

Annexe 4: Chaleur spécifique de l'oxygène.

Vapeur saturée: table de la température

Temp. °C <i>T</i>	Pres. kPa <i>P</i>	Volume massique m ³ /kg		Énergie interne kJ/kg			Enthalpie kJ/kg			Entropie kJ/kg·K		
		Liquide sat. <i>v_f</i>	Vapeur sat. <i>v_g</i>	Liquide sat. <i>u_f</i>	Évap. <i>u_{fg}</i>	Vapeur sat. <i>u_g</i>	Liquide sat. <i>h_f</i>	Évap. <i>h_{fg}</i>	Vapeur sat. <i>h_g</i>	Liquide sat. <i>s_f</i>	Évap. <i>s_{fg}</i>	Vapeur sat. <i>s_g</i>
		0.01	0.6113	0.001 000	206.14	.00	2375.3	2375.3	.01	2501.3	2501.4	.0000
5	0.8721	0.001 000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001 000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001 001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001 002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001 003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001 004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001 006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001 008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001 010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001 012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001 015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001 017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001 020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8953	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001 023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001 026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001 029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001 033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001 036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001 040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
100	Mpa 0.101 35	0.001 044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.120 82	0.001 048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	0.143 27	0.001 052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	0.169 06	0.001 056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	0.198 53	0.001 060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	0.2321	0.001 065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	0.2701	0.001 070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135	0.3130	0.001 075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	0.3613	0.001 080	0.5089	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	0.4154	0.001 085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	0.4758	0.001 091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001 096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001 102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001 108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001 114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175	0.8920	0.001 121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6256
180	1.0021	0.001 127	0.194 05	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185	1.1227	0.001 134	0.174 09	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190	1.2544	0.001 141	0.156 54	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195	1.3978	0.001 149	0.141 05	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2835	4.1863	6.4698
200	1.5538	0.001 157	0.127 36	850.65	1744.7	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	4.1014	6.4323
205	1.7230	0.001 164	0.115 21	873.04	1724.5	2597.5	875.04	1921.0	2796.0	2.3780	4.0172	6.3952
210	1.9062	0.001 173	0.104 41	895.53	1703.9	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	3.9337	6.3585
215	2.104	0.001 181	0.094 79	918.14	1682.9	2601.1	920.62	1879.9	2800.5	2.4714	3.8507	6.3221
220	2.318	0.001 190	0.086 19	940.87	1661.5	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	3.7683	6.2861
225	2.548	0.001 199	0.078 49	963.73	1639.6	2603.3	966.78	1836.5	2803.3	2.5639	3.6863	6.2503
230	2.795	0.001 209	0.071 58	986.74	1617.2	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	3.6047	6.2146
235	3.060	0.001 219	0.065 37	1009.89	1594.2	2604.1	1013.62	1790.5	2804.2	2.6558	3.5233	6.1791
240	3.344	0.001 229	0.059 76	1033.21	1570.8	2604.0	1037.32	1766.5	2803.8	2.7015	3.4422	6.1437
245	3.648	0.001 240	0.054 71	1056.71	1546.7	2603.4	1061.23	1741.7	2803.0	2.7472	3.3612	6.1083
250	3.973	0.001 251	0.050 13	1080.39	1522.0	2602.4	1085.36	1716.2	2801.5	2.7927	3.2802	6.0730
255	4.319	0.001 263	0.045 98	1104.28	1496.7	2600.9	1109.73	1689.8	2799.5	2.8383	3.1992	6.0375
260	4.688	0.001 276	0.042 21	1128.39	1470.6	2599.0	1134.37	1662.5	2796.9	2.8838	3.1181	6.0019
265	5.081	0.001 289	0.038 77	1152.74	1443.9	2596.6	1159.28	1634.4	2793.6	2.9294	3.0368	5.9662
270	5.499	0.001 302	0.035 64	1177.36	1416.3	2593.7	1184.51	1605.2	2789.7	2.9751	2.9551	5.9301
275	5.942	0.001 317	0.032 79	1202.25	1387.9	2590.2	1210.07	1574.9	2785.0	3.0208	2.8730	5.8938
280	6.412	0.001 332	0.030 17	1227.46	1358.7	2586.1	1235.99	1543.6	2779.6	3.0668	2.7903	5.8571
285	6.909	0.001 348	0.027 77	1253.00	1328.4	2581.4	1262.31	1511.0	2773.3	3.1130	2.7070	5.8199
290	7.436	0.001 366	0.025 57	1278.92	1297.1	2576.0	1289.07	1477.1	2766.2	3.1594	2.6227	5.7821
295	7.993	0.001 384	0.023 54	1305.2	1264.7	2569.9	1316.3	1441.8	2758.1	3.2062	2.5375	5.7437
300	8.581	0.001 404	0.021 67	1332.0	1231.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	2.4511	5.7045
305	9.202	0.001 425	0.019 948	1359.3	1195.9	2555.2	1372.4	1366.4	2738.7	3.3010	2.3633	5.6643
310	9.856	0.001 447	0.018 350	1387.1	1159.4	2546.4	1401.3	1326.0	2727.3	3.3493	2.2737	5.6230
315	10.547	0.001 472	0.016 867	1415.5	1121.1	2536.6	1431.0	1283.5	2714.5	3.3982	2.1821	5.5804
320	11.274	0.001 499	0.015 488	1444.6	1080.9	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	2.0882	5.5362
330	12.845	0.001 561	0.012 996	1505.3	993.7	2498.9	1525.3	1140.6	2665.9	3.5507	1.8909	5.4417
340	14.586	0.001 638	0.010 797	1570.3	894.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	1.6763	5.3357
350	16.513	0.001 740	0.008 813	1641.9	776.6	2418.4	1670.6	893.4	2563.9	3.7777	1.4335	5.2112
360	18.651	0.001 893	0.006 945	1725.2	626.3	2351.5	1760.5	720.5	2481.0	3.9147	1.1379	5.0526
370	21.03	0.002 213	0.004 925	1844.0	384.5	2228.5	1890.5	441.6	2332.1	4.1106	.6865	4.7971
374.14	22.09	0.003 155	0.003 155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Annexe 5: Table thermodynamique liquide – vapeur

Vapeur surchauffée

T	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
P = .010 MPa (45.81)				P = .050 MPa (81.33)				P = .10 MPa (99.63)				
Sat.	14.674	2437.9	2584.7	8.1502	3.240	2483.9	2645.9	7.5939	1.6940	2506.1	2675.5	7.3594
50	14.869	2443.9	2592.6	8.1749								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4479	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614
150	19.512	2587.9	2783.0	8.6882	3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038	4.356	2659.9	2877.7	8.1580	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002	4.820	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2158
400	31.063	2968.9	3279.6	9.6077	6.209	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978	7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.7	9.0976
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2	9.3398
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6281	9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5652
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8396	10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7767
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0393	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287	12.674	4257.4	4891.1	10.4859	6.337	4257.3	4891.0	10.1659
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5	10.5183
P = .20 MPa (120.23)				P = .30 MPa (133.55)				P = .40 MPa (143.63)				
Sat.	.8857	2529.5	2706.7	7.1272	.6058	2543.6	2725.3	6.9919	.4625	2553.6	2738.6	6.8959
150	.9596	2576.9	2768.8	7.2795	.6339	2570.8	2761.0	7.0778	.4708	2564.5	2752.8	6.9299
200	1.0803	2654.4	2870.5	7.5066	.7163	2650.7	2865.6	7.3115	.5342	2646.8	2860.5	7.1706
250	1.1988	2731.2	2971.0	7.7086	.7964	2728.7	2967.6	7.5166	.5951	2726.1	2964.2	7.3789
300	1.3162	2808.6	3071.8	7.8926	.8753	2806.7	3069.3	7.7022	.6548	2804.8	3066.8	7.5662
400	1.5493	2966.7	3276.6	8.2218	1.0315	2965.6	3275.0	8.0330	.7726	2964.4	3273.4	7.8985
500	1.7814	3130.8	3487.1	8.5133	1.1867	3130.0	3486.0	8.3251	.8893	3129.2	3484.9	8.1913
600	2.013	3301.4	3704.0	8.7770	1.3414	3300.8	3703.2	8.5892	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558
700	2.244	3478.8	3927.6	9.0194	1.4957	3478.4	3927.1	8.8319	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987
800	2.475	3663.1	4158.2	9.2449	1.6499	3662.9	4157.8	9.0576	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244
900	2.706	3854.5	4395.8	9.4566	1.8041	3854.2	4395.4	9.2692	1.3529	3853.9	4395.1	9.1362
1000	2.937	4052.5	4640.0	9.6563	1.9581	4052.3	4639.7	9.4690	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360
1100	3.168	4257.0	4890.7	9.8458	2.1121	4256.8	4890.4	9.6585	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256
1200	3.399	4467.5	5147.3	10.0262	2.2661	4467.2	5147.1	9.8389	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060
1300	3.630	4683.2	5409.3	10.1982	2.4201	4683.0	5409.0	10.0110	1.8151	4682.8	5408.8	9.8780
P = .50 MPa (151.86)				P = .60 MPa (158.85)				P = .80 MPa (170.43)				
Sat.	.3749	2561.2	2748.7	6.8213	.3157	2567.4	2756.8	6.7600	.2404	2576.8	2769.1	6.6628
200	.4249	2642.9	2855.4	7.0592	.3520	2638.9	2850.1	6.9665	.2608	2630.6	2839.3	6.8158
250	.4744	2723.5	2960.7	7.2709	.3938	2720.9	2957.2	7.1816	.2931	2715.5	2950.0	7.0384
300	.5226	2802.9	3064.2	7.4599	.4344	2801.0	3061.6	7.3724	.3241	2797.2	3056.5	7.2328
350	.5701	2882.6	3167.7	7.6329	.4742	2881.2	3165.7	7.5464	.3544	2878.2	3161.7	7.4089
400	.6173	2963.2	3271.9	7.7938	.5137	2962.1	3270.3	7.7079	.3843	2959.7	3267.1	7.5716
500	.7109	3128.4	3483.9	8.0873	.5920	3127.6	3482.8	8.0021	.4433	3126.0	3480.6	7.8673
600	.8041	3299.6	3701.7	8.3522	.6697	3299.1	3700.9	8.2674	.5018	3297.9	3699.4	8.1333
700	.8969	3477.5	3925.9	8.5952	.7472	3477.0	3925.3	8.5107	.5601	3476.2	3924.2	8.3770
800	.9896	3662.1	4156.9	8.8211	.8245	3661.8	4156.5	8.7367	.6181	3661.1	4155.6	8.6033
900	1.0822	3853.6	4394.7	9.0329	.9017	3853.4	4394.4	8.9486	.6761	3852.8	4393.7	8.8153
1000	1.1747	4051.8	4639.1	9.2328	.9788	4051.5	4638.8	9.1485	.7340	4051.0	4638.2	9.0153
1100	1.2672	4256.3	4889.9	9.4224	1.0559	4256.1	4889.6	9.3381	.7919	4255.6	4889.1	9.2050
1200	1.3596	4466.8	5146.6	9.6029	1.1330	4466.5	5146.3	9.5185	.8497	4466.1	5145.9	9.3855
1300	1.4521	4682.5	5408.6	9.7749	1.2101	4682.3	5408.3	9.6906	.9076	4681.8	5407.9	9.5575
P = 1.00 MPa (179.91)				P = 1.20 MPa (187.99)				P = 1.40 MPa (195.07)				
Sat.	.194 44	2583.6	2778.1	6.5865	.163 33	2588.8	2784.8	6.5233	.140 84	2592.8	2790.0	6.4693
200	.2060	2621.9	2827.9	6.6940	.169 30	2612.8	2815.9	6.5898	.143 02	2603.1	2803.3	6.4975
250	.2327	2709.9	2942.6	6.9247	.192 34	2704.2	2935.0	6.8294	.163 50	2698.3	2927.2	6.7467
300	.2579	2793.2	3051.2	7.1229	.2138	2789.2	3045.8	7.0317	.182 28	2785.2	3040.4	6.9534
350	.2825	2875.2	3157.7	7.3011	.2345	2872.2	3153.6	7.2121	.2003	2869.2	3149.5	7.1360
400	.3066	2957.3	3263.9	7.4651	.2548	2954.9	3260.7	7.3774	.2178	2952.5	3257.5	7.3026
500	.3541	3124.4	3478.5	7.7622	.2946	3122.8	3476.3	7.6759	.2521	3121.1	3474.1	7.6027
600	.4011	3296.8	3697.9	8.0290	.3339	3295.6	3696.3	7.9435	.2860	3294.4	3694.8	7.8710
700	.4478	3475.3	3923.1	8.2731	.3729	3474.4	3922.0	8.1881	.3195	3473.6	3920.8	8.1160
800	.4943	3660.4	4154.7	8.4996	.4118	3659.7	4153.8	8.4148	.3528	3659.0	4153.0	8.3431
900	.5407	3852.2	4392.9	8.7118	.4505	3851.6	4392.2	8.6272	.3861	3851.1	4391.5	8.5556
1000	.5871	4050.5	4637.6	8.9119	.4892	4050.0	4637.0	8.8274	.4192	4049.5	4636.4	8.7559
1100	.6335	4255.1	4888.6	9.1017	.5278	4254.6	4888.0	9.0172	.4524	4254.1	4887.5	8.9457
1200	.6798	4465.6	5145.4	9.2822	.5665	4465.1	5144.9	9.1977	.4855	4464.7	5144.4	9.1262
1300	.7261	4681.3	5407.4	9.4543	.6051	4680.9	5407.0	9.3698	.5186	4680.4	5406.5	9.2984
P = 1.60 MPa (201.41)				P = 1.80 MPa (207.15)				P = 2.00 MPa (212.42)				
Sat.	.123 80	2596.0	2794.0	6.4218	.110 42	2598.4	2797.1	6.3794	.099 63	2600.3	2799.5	6.3409
225	.132 87	2644.7	2857.3	6.5518	.116 73	2636.6	2846.7	6.4808	.103 77	2628.3	2835.8	6.4147
250	.141 84	2692.3	2919.2	6.6732	.124 97	2686.0	2911.0	6.6066	.111 44	2679.6	2902.5	6.5453
300	.158 62	2781.1	3034.8	6.8844	.140 21	2776.9	3029.2	6.8226	.125 47	2772.6	3023.5	6.7664
350	.174 56	2866.1	3145.4	7.0694	.154 57	2863.0	3141.2	7.0100	.138 57	2859.8	3137.0	6.9563
400	.190 05	2950.1	3254.2	7.2374	.168 47	2947.7	3250.9	7.1794	.151 20	2945.2	3247.6	7.1271
500	.2203	3119.5	3472.0	7.5390	.195 50	3117.9	3469.8	7.4825	.175 68	3116.2	3467.6	7.4317
600	.2500	3293.3	3693.2	7.8080	.2220	3292.1	3691.7	7.7523	.199 60	3290.9	3690.1	7.7024
700	.2794	3472.7	3919.7	8.0535	.2482	3471.8	3918.5	7.9983	.2232	3470.9	3917.4	7.9487
800	.3086	3658.3	4152.1	8.2808	.2742	3657.6	4151.2	8.2258	.2467	3657.0	4150.3	8.1765
900	.3377	3850.5	4390.8	8.4935	.3001	3849.9	4390.1	8.4386	.2700	3849.3	4389.4	8.3895
1000	.3668	4049.0	4635.8	8.6938	.3260	4048.5	4635.2	8.6391	.2933	4048.0	4634.6	8.5901
1100	.3958	4253.7	4887.0	8.8837	.3518	4253.2	4886.4	8.8290	.3166	4252.7	4885.9	8.7800

Properties of air at 1 atm pressure

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Density $\rho, \text{kg/m}^3$	Specific Heat $c_p, \text{J/kg}\cdot\text{K}$	Thermal Conductivity $k, \text{W/m}\cdot\text{K}$	Thermal Diffusivity $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Dynamic Viscosity $\mu, \text{kg/m}\cdot\text{s}$	Kinematic Viscosity $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Prandtl Number Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Note: For ideal gases, the properties c_p , k , μ , and Pr are independent of pressure. The properties ρ , ν , and α at a pressure P (in atm) other than 1 atm are determined by multiplying the values of ρ at the given temperature by P and by dividing ν and α by P .

Source: Data generated from the EES software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. Original sources: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, and P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

Annexe 7 : Propriété de l'air à 1atm

Résumé

Ce mémoire présente une étude approfondie de la chaudière à vapeur MIRA 4000, réalisée lors d'un stage pratique au sein de l'entreprise Bejaia Emballage. L'étude comprend l'analyse des paramètres de combustion, l'évaluation du bilan énergétique et exergetique, l'identification des pertes globales et la proposition des améliorations dans le but de réduire les pertes et augmenter le rendement. Les résultats de cette étude fournissent des informations précieuses pour optimiser l'efficacité énergétique de la chaudière à tube de fumée.

Mots clés

Chaudière – Pertes – Rendement – combustion – Exergie – Energie

Abstract

This thesis presents an in-depth study of the MIRA 4000 steam boiler, conducted during a practical internship at BEJAIA PACKAGING COMPANY. The study includes the analysis of combustion parameters, evaluation of energy and exergy balances, identification of overall losses, and proposal of improvements aimed at reducing losses and increasing efficiency. The results of this study provide valuable information for optimizing the energy efficiency of the fire-tube boiler.

Keywords:

Boiler – Losses – Efficiency – Combustion – Exergy – Energy