

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR =



جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa

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 :

ZAICHI Sara

GUERNANE Cherifa

Thème

**Détermination de rendement actuel d'une chaudière haute pression à tube
d'eau CEVITAL (Bejaia)**

Soutenu le 22/06/2025 devant le jury composé de:

M. Allouche Moussa

Président

M. NAIT Bouda Fayçal

Rapporteur

M. Mouloud Smail

Examineur

Année Universitaire : 2024-2025



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 :

ZAICHI

Prénom :

SARA

Matricule :

181833002621

Spécialité et/ou Option :

Installations Energétiques et turbomachines

Département :

Génie..Mécanique

Faculté :

Sciences.thermologies

Année universitaire :

2024/2025

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

Intitulé: Détermination le rendement actuel d'une chaudière haute pression à tube d'eau
CEVETAL (Bejaia).

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 Béjaia le 08/07/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

.....



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 :

GUERNANE

Prénom :

Cherifa

Matricule :

191933004481

Spécialité et/ou Option :

Installations Énergétiques et Turbomachines

Département :

Génie Mécanique

Faculté :

Sciences Exactes

Année universitaire :

2024/2025

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

Intitulé: Détermination le rendement actuel d'une chaudière haute pression à tube d'eau
CEVETAL (Bejaia).

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 Béjaia le 08/07/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

.....

Remerciements

Avant tout, nous tenons à remercier le Bon Dieu de nous avoir accordé la santé, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce modeste mémoire.

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à nos parents, qui nous ont toujours soutenus, encouragés, et n'ont jamais cessé de croire en nous. Leur présence et leur aide ont été essentielles tout au long de ce parcours.

Nos remerciements les plus sincères vont également à notre encadreur, Mr. NAITBOUDA Fayçal, pour ses conseils, sa disponibilité et son accompagnement bienveillant tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous exprimons également notre reconnaissance à tous les enseignants de l'université Abderrahmane Mira de Bejaïa, en particulier à ceux qui nous ont accompagnés durant ces deux dernières années, pour leur savoir, leur pédagogie et leur bienveillance.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer notre travail.

Enfin, nous adressons un grand merci à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce mémoire. Nous leur en sommes sincèrement reconnaissants.



Z.Sara & G.Chérifa -

Dédicaces

Je dédie ce travail

*A ma chère maman Karima qui m'a soutenu et encouragé
durant ces années d'étude.*

*A mon cher père Karim qui m'a entouré de l'amour, sans eux
je ne serais pas arrivé là où j'en suis, Merci beaucoup.*

*A mes deux sœur Mélina et Léa je vous souhaite que de la
réussite dans votre chemin d'étude.*

A mon frère Anis qui est toujours vivre dans mon cœur.

*Et sans oubliée ma chère grand-mère Fatiha qui a fait plus
qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon
chemin dans leur vie.*

A ma belle-famille.

*A mon Futur mari qui m'a toujours encouragée et je le
remercie pour sa patience.*

*A ma binôme Cherifa et toutes nos amies de la section Génie
mécanique. Je les souhaite plus de succès.*

 - Z.Sara -

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

*Avec tout mon amour et toute ma gratitude, A ceux qui ont
toujours été à mes côtés.*

*A ma maman Fatiha, la plus douce et la plus forte, merci pour
ton amour, tes prières et ton soutien sans limite.*

*A mon cher papa Saïd, merci pour tes sacrifices, ta patience et
ta confiance en moi, et pour tout ce que tu as fait pour moi
sans jamais rien attendre en retour.*

*A ma sœur et à mon frère, merci d'avoir toujours été là, avec
vos sourires et vos mots qui réchauffent le cœur.*

*A ma binôme Sara et tous mes amis de classe. Merci pour votre
présence, vos encouragements et votre amitié tout au long de
ce chemin d'étude.*

Ce travail, je le partage avec vous, avec tout mon cœur.

 *G. Cherifa -*

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Sommaire	
Nomenclature	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction Générale	1

Chapitre I

Présentation générale des chaudières

Introduction	11
I.1. Définitions d'une chaudière	11
I.2. Rôle des chaudières industrielle	12
I.3. Principe de fonctionnement d'une chaudière	12
I.4. Différents types de chaudières.....	12
I.4.1. Chaudière à tube d'eau.....	13
I.4.1.1. Principaux avantages des chaudières à tubes d'eau	15
I.4.1.2. Principaux inconvénients	15
I.4.1.3. En fonction des modes de circulation	15
A. Circulation naturelle	16
B. Circulation forcée	17
I.4.2. Chaudière à tube fumé	17
I.4.2.1. Principaux avantages des chaudières à tubes de fumée	18
I.4.2.2. Principaux inconvénients	19
I.4.3. Comparaison des performances des deux types de chaudières	19
I.5. Mécanisme de la chaudière	20
I.6. Présentation des composants d'une chaudière	20
I.6.1. Ballon de chaudière.....	20
I.6.1.1. Ballon de vapeur supérieur	20
I.6.1.2. Ballon inférieur	21
I.6.2. Chambre de combustion.....	22
I.6.3. Économiseur	23
I.6.4. Brûleur.....	24
I.6.5. Ventilateur de soufflage	<u>25</u>

Sommaire

I.6.6. Les surchauffeurs (SBT), (SHT) et désurchauffeurs	25
I.6.7. Cheminée	26
I.7. Pompes	27
I.7.1.1. Pompe d'alimentation	27
I.7.2. Pompe et régulateur de pression	28
I.8. Bâche alimentaire	28
Conclusion	29

Chapitre II

Analyse théorique de la combustion

Introduction	31
II.1. Généralité su la combustion	31
II.1.1. Définition de la combustion	31
II.2. Pouvoir Calorifique	32
II.3. Les déférentes types de combustion	32
II.3.1. Combustion complète avec excès d'air	32
II.3.2. Combustion incomplète par manque d'air	33
II.4. Conditions nécessaires pour une combustion parfaite.....	33
II.4.1. Paramètres de la combustion.....	33
II.5. Analyse thermochimique de la combustion	34
II.5.1. Réaction chimique de la combustion	34
II.6. Types de Combustible	35
II.7. Les calculs des transferts d'énergie	35
II.7.1. Évaluation des quantités de matière	35
II.8. Combustion volumétrique du gaz naturel.....	35
II.8.1. Détermination de L'équation stœchiométrique de la réaction de combustion.....	36
II.8.2. Quantité d'air exploitée dans les conditions réelles	36
II.9. Fractions massiques des composants du gaz naturel	37
II.9.1. La masse molaire du combustible	37
II.10. Caractéristique du combustible (Gaz naturel).....	38
II.10.1. Débit massique de l'air	39
II.10.2. Débit massique de gaz du combustible	39
II.11. Bilan énergétique de la chaudière.....	39
II.11.1. Pertes thermique globales	40
II.11.2. Pertes par fumée	40

Sommaire

II.11.3. Pertes par purges.....	41
II.11.4. Pertes par parois de la chaudière	41
II.11.4.1. Pertes par rayonnement	41
II.11.4.2. Pertes par convection	42
II.12. Nombre de Nusslet	42
II.13. Nombre de Rayleigh	43
II.14. Nombre de grashof	43
II.15. Le rendement de Combustion	44
II.16. Le rendement thermique	44
II.17. La puissance calorifique dans la chaudière.....	44
II.18. La puissance utile	45
II.19. Relation entre les phases liquide et vapeur	45
II.20. Diagramme entropique T-S.....	46
Conclusion	47

Chapitre III

Analyse énergétique appliquée à la chaudière

Introduction	499
III.1. Analyse de l'efficacité énergétique de la pompe	49
III.2. Etude du fonctionnement du brûleur	51
III.3. Etude de l'économiseur de la chaudière	51
III.4. Etude énergétique du ballon	52
III.5. Etude énergétique de Surchauffeur basse température.....	52
III.6. Etude énergétique de Surchauffeur haute température.....	53
III.7. Puissance calorifique dans la chaudière	53
III.8. Calcul du rendement utile de la chaudière avec la méthode directe	54
III.9. Etude déférentes pertes de charge	54
III.9.1. Pertes thermique par parois.....	54
III.9.1.1. Calcul des Pertes par convection.....	54
III.9.1.2. Calcul des pertes thermique par rayonnement	56
III.9.2. Calcul des pertes par fumée	57
III.9.3. Calcul des pertes par purge.....	58
III.9.4. Pertes par Combustion.....	58
III.9.5. Calcul des perte globale d'une chaudière	59
III.10. Détermination du rendement de combustion	59

Sommaire

III.11. Calcul du rendement utile de la chaudière avec la méthode indirecte	59
III.12. Calcul du rendement utile de la chaudière avec les perles de purge	59
Conclusion	60
Conclusion Générale	62
Références bibliographiques.....	65
Annexes	69

Nomenclature

Nomenclature

Symbole	Description	Unité
C_p	Chaleur spécifique de l'eau	$\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$
D	Diamètre	m
Gr	Nombre de GRASHOF	-
G	Accélération de la pesanteur	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
h	Coefficient d'échange convectif de la chaleur	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
h_e	L'enthalpie entre d'eau liquide comprimée	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
h_s	L'entropie sortie de vapeur surchauffé	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
M_{Comb}	Débit massique du combustible	$\text{Kg comb} \cdot \text{s}^{-1}$
m_{comb}	Masse molaire des gaz de combustion	$\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$
M_p	Débit de la pompe	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
M_{Ecn}	Débit du l'économiseur	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
M_{SBT}	Débit du surchauffeur basse température	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
M_{SHT}	Débit du surchauffeur haute température	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
M_{Bln}	Débit du ballon	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
M_G	Débit masse de gaz de combustion	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Mo_2	La quantité d'oxygène stœchiométrique	$\text{kmol air} \cdot \text{kmol}^{-1} \text{comb}$
m_l	Quantité d'air effective	$\text{kmol air} \cdot \text{kmol}^{-1}$
\dot{m}_A	Débit massique de l'air	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
m_{N_2}	Masse molaire d'azote	$\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$
m_{O_2}	Masse molaire d'oxygène	$\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$
N_{Comb}	Débit quantité molaire de combustible	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Nomenclature

N_u	Nombre de Nusselt	
N	Coefficient de corrélation	
P_{Comb}	Pression du combustible	Pa
P_i	Puissance introduite	kW
P_{Conv}	Pertes par convection	kW
P_{fum}	Pertes par fumées	kW
P_{par}	Pertes par parois	kW
P_{pur}	Pertes par purge	kW
P_{Comb}	Pertes par combustion	kW
$\Sigma pertes$	La somme des Pertes	kW
P_r	Nombre de prandtl	
P_{ray}	Pertes par rayonnement	kW
P_u	Puissance utile	kW
Q_{Ecn}	Puissance du l'économiseur	kW
Q_{SBT}	Puissance du surchauffeur basse température	kW
Q_{SHT}	Puissance du surchauffeur haute température	kW
R	Constante molaire des gaz parfaits	J.mol ⁻¹ .K ⁻¹
Ra	Nombre de Rayleigh	
S	Surface	m ²
T_{Comb}	Température du combustible	K
T_{air}	Température de l'air	K
T_{par}	Température de paroi	K
T_{Comb}	Température de combustible	K

Nomenclature

V	Volume	m^3
V_{Comb}	Débit-volume du combustible	$m^3.s^{-1}$
W_p	Puissance de la pompe	kW
P_{utile}	La puissance utile	Kw

Lettres grecs

Symbole Description

β	Coefficient de dilatation	K^{-1}
λ	Conductivité thermique	$W/m.K$
λ_e	Facteur d'air	
ν	Viscosité cinématique	$m^2.s^{-1}$
σ	Constante de boltzmann	$W/m^2.K^4$
ε	L'émissivité du matériau	
η	Rendement	

Symbole description

A	Air	
Comb	Combustible	
PC	Pouvoir calorifique	$kJ.kg^{-1}$
PCS	Pouvoir calorifique supérieure	$kJ.kg^{-1}$
PCI	Pouvoir calorifique inférieure	$kJ.kg^{-1}$
ΔT	Gradient températures	K
Δh	Gradient enthalpies	kJ/kg
Y	Estimation des pertes par purge	

Liste des tableaux

Tableau I.1: comparaison des performances entre les chaudières à tubes de fumées et les chaudières à tubes d'eau.....	19
Tableau II.1: composition volumique en % du gaz naturel.....	35
Tableau II.2: Composition massique en% du gaz naturel.	37
Tableau II.3: Caractéristique du combustible (gaz naturel)	38
Tableau III.1: Le coefficient dépend de la nature combustible.	57

Liste des figures

Figure I.1 : Localisation géographique du complexe CEVITAL	4
Figure I.2 : Principe de fonctionnement du groupe turbo-alternateur	6
Figure I.3 : Organigramme de la direction énergie	7
Figure I.1 : Chaudière industrielle	11
Figure I.2 : Chaudière à tube d'eau	13
Figure I.3 : Schéma type d'une Chaudière à tubes d'eau	14
Figure I.4 : Principe de la circulation naturelle	16
Figure I.5 : Principe de la circulation forcée	17
Figure I.6 : Chaudière vapeur à tubes de fumées	18
Figure I.7 : Vue générale des approvisionnements et des mécanismes de la chaudière.	20
Figure I.8 : Coupe du ballon de vapeur supérieur de chaudière	21
Figure I.9 : Schéma du ballon inférieur et supérieur de la chaudière.	22
Figure I.10 : Brûleurs dans la chambre de combustion	23
Figure I.11 : Économiseur de chaudière	24
Figure I.12 : Deux Brûleurs et leur schéma dans la chambre de combustion.	24
Figure I.13 : Schéma d'un ventilateur.	25
Figure I.14 : Présentation du surchauffeur et désurchauffeur.	26
Figure I.15 : Schéma d'une cheminé.	26
Figure I.16 : Schéma du processus de cogénération Cevital.....	27
Figure I.17 : Schéma d'une pompe centrifuge	28
Figure II.1 : Bilan énergétique de la chaudière	40
Figure II.2 : Relation entre pression, volume et température.	46
Figure II.3 : Diagramme entropique (T, S) de l'eau.....	47
Figure III.1 : Comparaison du rendement thermique avec deux méthodes différentes	60

Introduction Générale

Introduction Générale

La vapeur d'eau est très utilisée dans l'industrie, notamment pour produire de la chaleur ou de l'électricité. Pour cela, on utilise des chaudières, qui transforment l'eau en vapeur grâce à la chaleur produite par la combustion d'un combustible, comme le gaz naturel. Parmi les différents types de chaudières, celles à tubes d'eau haute pression sont particulièrement efficaces pour les besoins industriels importants, car elles produisent de la vapeur à haute température et haute pression.

L'objectif de ce mémoire est de déterminer le rendement actuel d'une chaudière à tubes d'eau haute pression. Le rendement permet de savoir si la chaudière fonctionne de façon efficace, c'est-à-dire si elle utilise bien l'énergie du combustible pour produire de la vapeur, avec un minimum de pertes.

Dans le premier chapitre, on présente le rôle de la vapeur dans l'industrie, ainsi que le fonctionnement général des chaudières à vapeur. On explique aussi comment la chaleur est produite et transférée à l'eau pour former de la vapeur.

Le deuxième chapitre s'intéresse plus particulièrement à la chaudière étudiée, une chaudière Stein à tubes d'eau. On y aborde deux aspects importants : la combustion (c'est-à-dire la réaction du gaz naturel qui produit la chaleur) et le bilan énergétique (qui permet de calculer combien d'énergie est utilisée et combien est perdue). Cette partie est importante pour bien comprendre les besoins de la chaudière et l'adapter aux conditions d'utilisation.

Le troisième chapitre est consacré à une analyse énergétique plus détaillée. On y calcule les différents rendements de la chaudière et on identifie les pertes d'énergie (par exemple dans les gaz d'échappement ou les parois de la chaudière). On utilise ces données pour évaluer les performances réelles de la chaudière et proposer des améliorations si nécessaires.

Ce travail permet donc de mieux comprendre le fonctionnement de la chaudière, d'évaluer ses performances, et d'envisager des solutions pour améliorer son efficacité énergétique.

*Présentation générale du
complexe Cervical*

Introduction

CEVITAL fait partie des premières entreprises algériennes créées à la suite de l'ouverture du pays à l'économie de marché. Fondée en 1998 grâce à un financement privé, l'entreprise a installé son complexe de production au port de Bejaïa, sur une superficie de 45 000 m².

Grâce à une large gamme de produits de haute qualité, CEVITAL joue un rôle important dans le développement de l'industrie agroalimentaire nationale. L'entreprise a pour objectif de répondre aux besoins du marché intérieur tout en exportant ses excédents de production.

Dans le contexte économique actuel, où la compétitivité repose sur la maîtrise des coûts, des charges et l'optimisation du rapport qualité/prix, seules les entreprises les plus performantes parviennent à se démarquer. CEVITAL s'inscrit dans cette dynamique, en négociant avec de grandes sociétés commerciales internationales. Ses produits sont aujourd'hui distribués dans plusieurs grandes villes.

I.1. Historique

CEVITAL fait partie des premières entreprises algériennes à avoir émergé suite à l'ouverture du pays à l'économie de marché. Fondée en 1998 grâce à des capitaux privés, l'entreprise a implanté son complexe de production au port de Bejaïa, sur une superficie de 45 000 m².

Ce complexe joue un rôle important dans le développement de l'industrie agroalimentaire nationale. Il a pour objectif principal de répondre aux besoins du marché local tout en visant l'exportation des excédents de production, grâce à une offre diversifiée de produits de qualité.

Dans le contexte actuel de la compétitivité accrue du secteur agroalimentaire, les entreprises qui parviennent à optimiser efficacement leurs coûts et leurs charges tout en garantissant un excellent rapport qualité/prix sont celles qui tirent leur épingle du jeu. CEVITAL s'inscrit pleinement dans cette dynamique. Elle négocie avec de grandes entreprises commerciales internationales et écoule ses produits dans plusieurs grandes villes africaines, telles que Lagos, Niamey, Bamako, Tunis ou encore Tripoli.

I.2. Situation géographique

CEVITAL est implantée sur le nouveau quai du port de Bejaïa, à environ 3 km au sud-ouest de la ville, à proximité immédiate de la Route Nationale 26. Cette localisation stratégique offre à l'entreprise un réel avantage en termes de logistique et de proximité économique. En effet, sa position proche à la fois du port et de l'aéroport facilite considérablement l'importation des matières premières et l'exportation des produits finis. Le site industriel s'étend sur une superficie de 14 hectares.

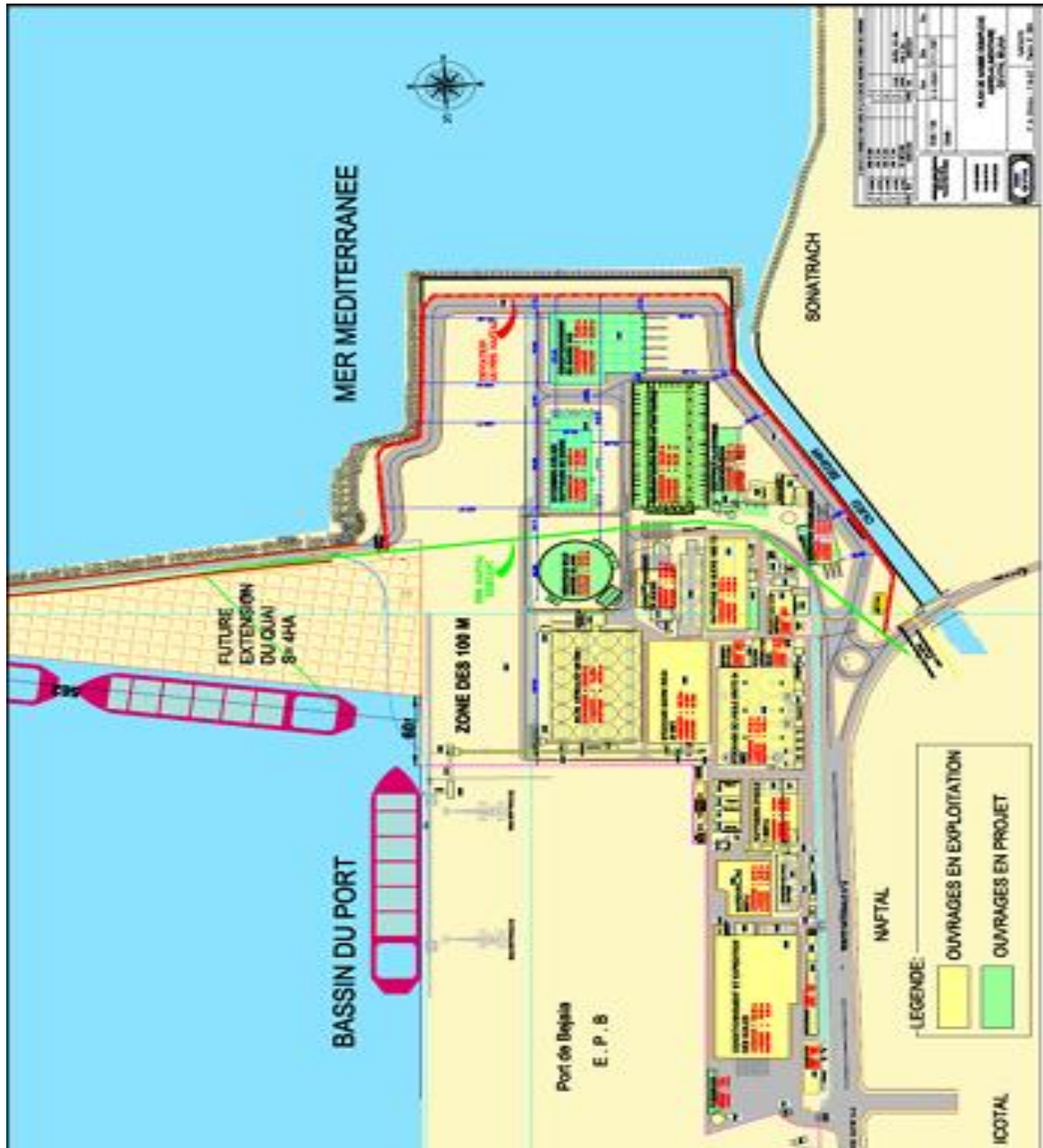


Figure I.1 : Localisation géographique du complexe CEVITAL.

I.3. Cogénération thermique à vapeur chez CEVITAL

La centrale de cogénération de CEVITAL repose sur une installation thermique à vapeur, équipée principalement de deux chaudières à tubes d'eau. Ces dernières vaporisent l'eau en brûlant du gaz naturel, produisant ainsi de la vapeur surchauffée à 54 bars et 480°C. Cette vapeur haute pression est ensuite dirigée vers deux turbines, où elle se détend en faisant tourner les aubes à 5 900 tr/min. Chaque turbine est reliée à une génératrice via un réducteur de vitesse, qui abaisse la rotation à 1 500 tr/min pour adapter l'entraînement au rotor de l'alternateur. Les génératrices produisent un courant électrique de 11 kV à 50 Hz, ensuite élevé à 30 kV par des transformateurs. Cette tension finale alimente le réseau interne de l'usine, fournissant l'énergie nécessaire aux différents sites de production.

I.3.1. Domaines d'activité de CEVITAL

Le complexe CEVITAL a été lancé en mai 1998, avec un démarrage effectif de son activité en décembre de la même année par le conditionnement d'huile. En février 1999, les travaux de génie civil pour la construction de la raffinerie ont commencé, et celle-ci est devenue opérationnelle en août 1999.

Les activités principales de CEVITAL sont centrées sur la production et la commercialisation d'huiles végétales, de margarine et de sucre. Le complexe comprend également des unités de fabrication d'emballages et d'autres installations industrielles. Voici un aperçu de ses capacités de production :

- Raffinage des huiles : 1 800 tonnes par jour.
- Conditionnement d'huile : 1 400 tonnes par heure.
- Production de margarine : 600 tonnes par jour.
- Fabrication d'emballages en PET (Polyéthylène Téréphtalate) : 9 600 unités par heure.
- Raffinage du sucre : 2 000 tonnes par jour.
- Deuxième unité de raffinage de sucre : 3 000 tonnes par jour.
- Capacité de stockage des céréales : 120 000 tonnes.
- Projets en cours : création d'une minoterie et d'une savonnerie.
- Cogénération : production d'énergie électrique avec une puissance théorique de 50 MW.

I.3.2. Description des composantes de la centrale à vapeur de CEVITAL

L'installation de l'unité de cogénération a pour objectif principal de couvrir les besoins énergétiques du complexe industriel. Elle permet essentiellement la production de vapeur et

la génération d'énergie thermique, utilisée dans l'ensemble du site, notamment dans les raffineries d'huile et de sucre, ainsi que dans la production d'électricité. [1]

Cette unité se compose de deux sections distinctes :

- La section de production de vapeur.
- La section de production d'électricité. [1]

Section de production de vapeur :

L'unité produit de la vapeur surchauffée à une pression et une température prédéfinies. Elle est équipée de plusieurs dispositifs essentiels au bon fonctionnement du système, parmi lesquels :

- La bache d'eau ultra pure
- La turbopompe
- L'économiseur
- Le ballon séparateur
- La chaudière [1]

➤ **Section de production d'électricité :**

La section de production d'électricité est composée de deux groupes turbo-alternateurs. La vapeur surchauffée, produite dans la section précédente, est acheminée vers une turbine où, sous haute température et pression, elle est convertie en énergie mécanique. Cette dernière est ensuite transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'un alternateur. L'ensemble formé par la turbine et l'alternateur constitue ce qu'on appelle un groupe turbo-alternateur.

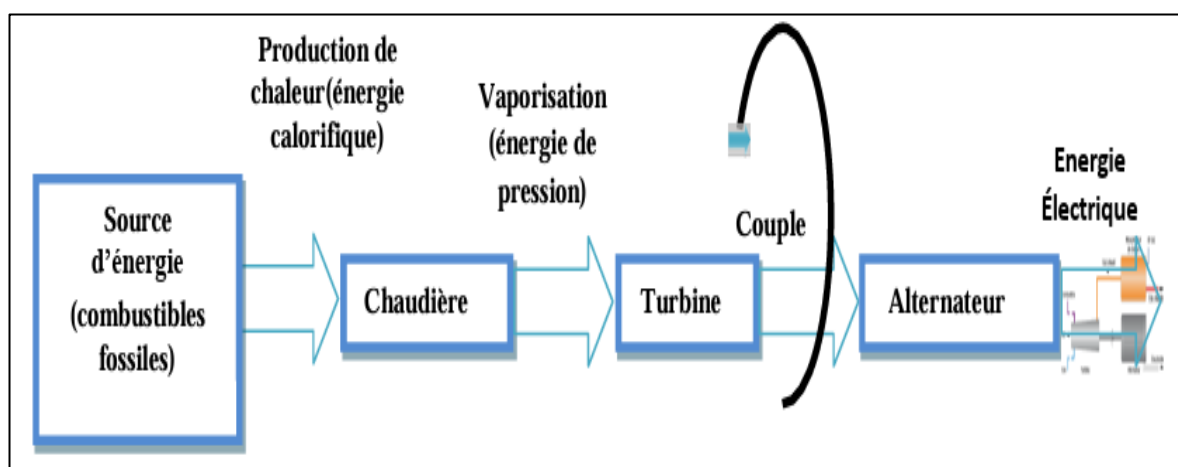


Figure I.2 : Principe de fonctionnement du groupe turbo-alternateur [1]

Les différents départements relevant de la direction de l'énergie sont illustrés dans l'organigramme ci-dessous :

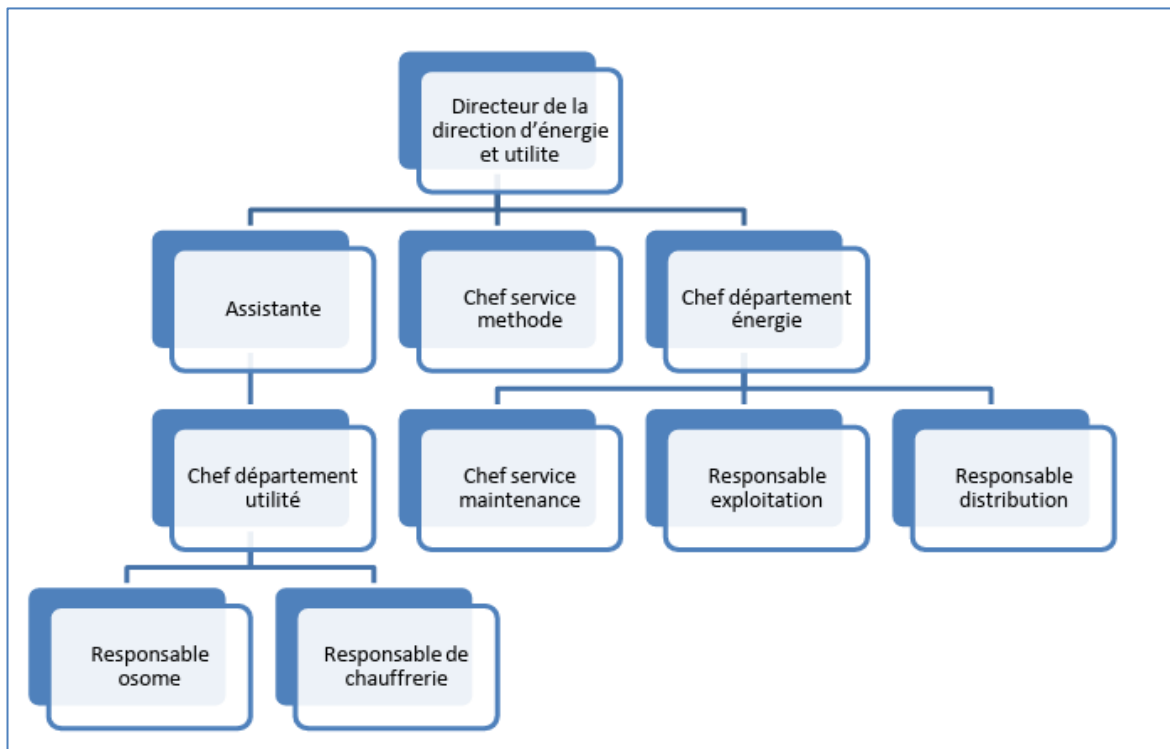


Figure I.3 : Organigramme de la direction énergie [2].

I.4. Définitions de cogénération

La cogénération, également connue sous le nom de production combinée de chaleur et d'électricité, est un procédé énergétique permettant de générer simultanément de l'électricité et de la chaleur à partir d'une seule source d'énergie, telle que le gaz naturel, le fioul ou encore la biomasse.

I.4.1. Différentes technologies de cogénération

Le terme cogénération désigne un concept général qui regroupe plusieurs technologies permettant la production simultanée de chaleur et d'électricité. Parmi les principales technologies utilisées, on peut citer :

- Les moteurs à piston.
- Les turbines à vapeur.
- Les turbines à gaz.
- Les piles à combustible.

Chaque système de cogénération se distingue par le type de combustible utilisé, son rendement global, ainsi que par la quantité et la température de la chaleur récupérable. Un

paramètre clé pour caractériser une installation de cogénération est le rapport chaleur/puissance, qui exprime la proportion entre l'énergie thermique récupérée et la puissance électrique produite pour un point de fonctionnement donné. [3]

I.4.2. Avantages de la cogénération

Le principal avantage d'une centrale de cogénération réside dans sa capacité à valoriser la chaleur produite tout en étant située à proximité des besoins thermiques. Contrairement aux installations classiques qui n'exploitent que 25 à 55 % de l'énergie contenue dans le combustible, la cogénération permet d'atteindre un rendement global de 60 à 90 %, selon les équipements utilisés et les applications envisagées. L'énergie thermique récupérée peut être utilisée dans divers domaines tels que les procédés industriels, le chauffage des bâtiments, la production d'eau chaude sanitaire ou même de froid, grâce à des systèmes de réfrigération par absorption.

Sur le plan économique, l'électricité produite représente souvent le facteur le plus déterminant. Sa « noblesse » réside dans sa facilité de transport et sa capacité à répondre à un large éventail de besoins énergétiques. [4]

Ainsi, lorsqu'une installation est conçue pour répondre à une demande thermique précise, il est vivement recommandé d'intégrer en parallèle une production d'électricité, afin de maximiser l'efficacité énergétique globale du système. [5]

I.4.3. Effets de la cogénération sur l'environnement

Les centrales thermiques sont souvent pénalisées par leurs émissions de polluants chimiques et de gaz à effet de serre. Toutefois, les avancées technologiques, notamment le développement de procédés plus efficaces comme la cogénération, permettent de réduire significativement ces émissions. Grâce à ces améliorations, le secteur de l'énergie thermique continue de contribuer à la croissance économique, en particulier dans les régions où les alternatives énergétiques sont limitées.

I.4.4. Présentation de la centrale de cogénération CEVITAL

L'unité de cogénération de CEVITAL a pour vocation de produire à la fois de l'énergie thermique et de l'énergie électrique, en exploitant un système capable de transformer une source d'énergie primaire en travail (électricité) et en chaleur (vapeur).

Pour assurer cette production combinée de chaleur et d'électricité, plusieurs équipements sont nécessaires au fonctionnement de la centrale, à savoir :

- Une bâche alimentaire
- Trois pompes alimentaires
- Deux chaudières
- Deux groupes turboalternateurs
- Six évapo-condenseurs
- Deux échangeurs à plaques

L'objectif principal de cette centrale est de fournir l'énergie thermique nécessaire aux différents procédés industriels du complexe, notamment aux deux raffineries de sucre (avec des capacités respectives de 1 600 et 3 000 tonnes par jour) ainsi qu'à la raffinerie d'huile.

Chapitre I
Présentation générale des
chaudières

Introduction

La vapeur d'eau est largement employée dans l'industrie pour différentes applications, notamment la production d'énergie thermique à travers des chaudières et différentes productions. Sa génération nécessite une source de chaleur. Les chaudières à vapeur fonctionnent comme des échangeurs thermiques, produisant de la vapeur à une pression et une température précises, adaptées à son utilisation, généralement alimentées par des combustibles. La combustion de ces sources d'énergie génère de la chaleur, qui est ensuite transférée à l'eau pour produire de la vapeur. [6]

I.1. Définitions d'une chaudière

Une chaudière est un appareil destiné à produire de la vapeur ou un fluide chaud, équipé d'un foyer où est brûlé un combustible. Elle fonctionne comme un générateur de vapeur, convertissant l'énergie calorifique du combustible en énergie thermodynamique via la vapeur. Son rôle principal est de transférer de manière continue de l'énergie thermique à un fluide. Cette énergie peut provenir de deux sources principales :

- **La combustion** (de carbone, fioul, gaz, bois, etc.).
- **La récupération de chaleur** d'un autre fluide déjà chauffé. [7]

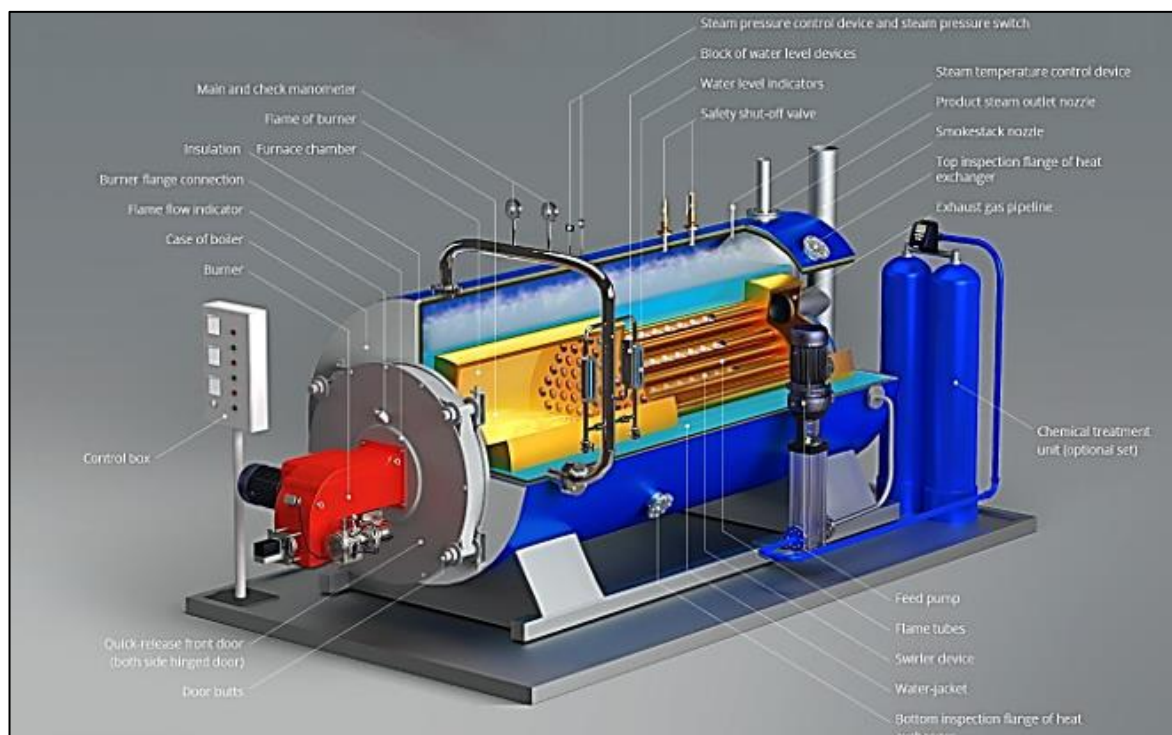


Figure I.1 : Chaudière industrielle

I.2. Rôle des chaudières industrielle

Une chaudière a pour principale fonction de transmettre de l'énergie thermique (issue ou non d'une combustion) à de l'eau sous pression, produisant ainsi de l'eau surchauffée, de la vapeur ou un fluide à l'état supercritique qui se transforme en vapeur lors de sa détente. Dans les installations industrielles, les chaudières à vapeur de grande capacité sont souvent couplées à une turbine pour générer de l'électricité.

On distingue différents types de chaudières selon leur source d'énergie : Chaudières à gaz, Chaudières au fioul, Chaudières à bois, Chaudières électriques, Chaudières hybrides (combinant plusieurs énergies). Par ailleurs, elles peuvent intégrer diverses technologies, telles que les systèmes classiques, cryogéniques ou à condensation.

I.3. Principe de fonctionnement d'une chaudière

Les principes de base Peu importe le modèle, une chaudière fonctionne selon des principes similaires :

- Source d'énergie : Elle nécessite un combustible (bois, fioul, gaz) ou une énergie (électricité, air pour les modèles thermodynamiques).
- Production de chaleur : Dans les chaudières à combustion, la chaleur est générée par la brûlure du carburant.
- Pour les versions électriques ou thermodynamiques, pas de flamme : l'énergie est convertie directement.
- Distribution : La chaleur produite est transmise à un circuit alimentant radiateurs, planchers chauffants et/ou eau chaude sanitaire.
- Évacuation : Les résidus de combustion sont évacués, sauf dans les chaudières à condensation, où la vapeur est recyclée pour améliorer l'efficacité.

Ainsi, quel que soit le type de chaudière, l'objectif reste le même : transformer l'énergie en chaleur utile pour le logement. [8]

I.4. Différents types de chaudières

Les chaudières industrielles se divisent en deux catégories principales :

- **Chaudières conventionnelles**

Dans ces chaudières, la chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau est produite par la combustion de liquides ou de gaz combustibles. On distingue deux types selon la circulation des fluides : Chaudières à tubes d'eau c'est l'eau qui circule dans des tubes

chauffés par les fumées de combustion. Et Chaudières à tubes de fumées c'est les fumées traversent des tubes immergés dans l'eau à chauffer.

- **Chaudières de récupération**

Elles récupèrent la chaleur des gaz chauds (fumées, fluides industriels, etc.) pour produire de la vapeur ou chauffer de l'eau. Leur conception dépend de la source de chaleur : Parfois comme une chaudière classique, Parfois avec des éléments adaptés, Où avec une technologie spéciale. [9]

I.4.1. Chaudière à tube d'eau

Les chaudières à tubes d'eau, développées entre 1958 et 1978, sont conçues pour fonctionner à des puissances et pressions très élevées (jusqu'à 150T/h et 200bars). Elles produisent un débit de vapeur généralement supérieur à 20 tonnes/heure, en moyenne ou haute pression. Ces chaudières comprennent deux réservoirs principaux : Un ballon distributeur, situé dans la partie inférieure et Un ballon collecteur (ou ballon de vaporisation), placé dans la partie supérieure. Ces deux réservoirs sont reliés par un faisceau de tubes vaporisateurs, à l'intérieur desquels l'eau circule et se transforme en vapeur sous l'effet de la chaleur. Les gaz issus de la combustion entrent directement en contact avec ces tubes, favorisant la vaporisation. La vapeur produite est ensuite récupérée dans le ballon supérieur, tandis que l'eau excédentaire redescend vers le ballon inférieur via des tubes de chute, qui ne sont pas exposés à la chaleur. [10]



Figure I.2 : Chaudière à tube d'eau

On observe sur la figure I.3

- **La chambre de combustion (B)** abrite les flammes générées par les brûleurs (A). Les tubes adjacents formant les parois de la chambre sont exposés au rayonnement de ces flammes. À l'extrémité de la chambre, certains tubes sont disposés en quinconce et légèrement déformés pour permettre le passage des fumées vers la zone de convection.
- **Le circuit d'échange par convection** comprend deux voies de circulation pour les fumées. La première voie (C) accueille les éventuels surchauffeurs (E) et (F). La seconde voie (D) permet une récupération de chaleur complémentaire sur les fumées. Les tubes formant les parois de la chaudière ainsi que les zones d'échange (C) et (D) sont reliés à deux ballons :
- **Le ballon supérieur (G)** réalise la séparation des deux phases liquides et Vapeur.
- La vapeur saturée sort par H avant d'alimenter les surchauffeurs
- **Le ballon inférieur (I)** alimente en eau liquide tous les tubes dans lesquels l'eau soumise à l'apport de chaleur se vaporise partiellement avant de retourner au ballon supérieur (J). [11]

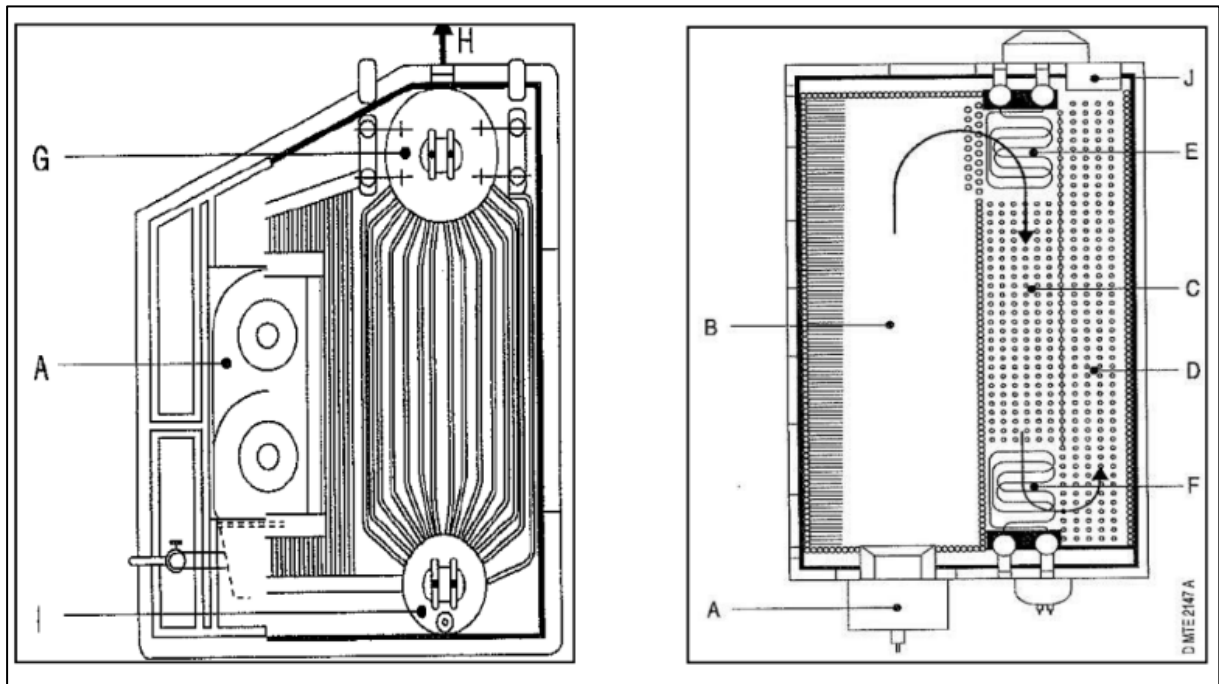


Figure I.3 : Schéma type d'une Chaudière à tubes d'eau. [11]

I.4.1.1. Principaux avantages des chaudières à tubes d'eau

- Fonctionnement à hautes performances, Capacité à opérer sous des pressions et températures extrêmes (jusqu'à 200 bars et 500°C).
- Production flexible de vapeur surchauffée, Intégration simplifiée grâce à des tubes dédiés pour la surchauffe.
- Réactivité aux variations de charge, adaptation rapide et efficace, même pour de fortes amplitudes de demande.

I.4.1.2. Principaux inconvénients

- Faible volume d'eau en circulation, nécessite un contrôle rigoureux des dosages des produits de traitement.
- Faible inertie du système, la capacité d'alimentation en eau doit s'adapter instantanément à toute augmentation de la demande en vapeur.

Classification des générateurs de vapeur à tubes d'eau, ces chaudières sont généralement caractérisées par :

- La position du réservoir supérieur.
- Le type de circulation d'eau naturelle ou forcée.
- Le nombre de ballons (monobloc ou multiples).
- Leur capacité de production.

I.4.1.3. En fonction des modes de circulation

La circulation de l'eau (ou de l'émulsion eau-vapeur) dans les tubes de la chaudière a deux fonctions essentielles : Refroidir efficacement les tubes exposés aux zones de forte chaleur (rayonnement direct du feu), où le flux thermique est maximal et Générer de la vapeur saturée en transformant progressivement l'eau en émulsion eau-vapeur. Il y a deux mécanismes principaux assurent cette circulation : la circulation naturelle et la circulation forcée.

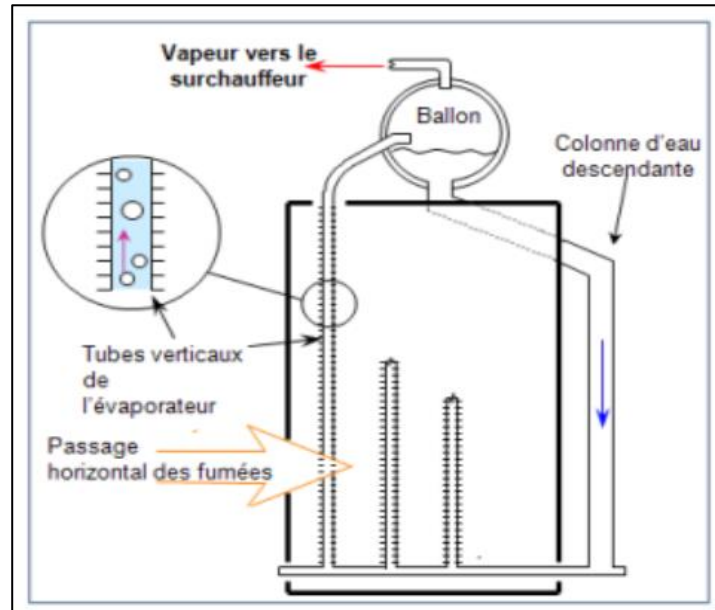
A. Circulation naturelle

Figure I.4 : Principe de la circulation naturelle. [12]

La circulation s'établit naturellement dans les circuits de la chaudière. Elle est provoquée par la différence de densité entre deux colonnes de fluide : l'une composée uniquement d'eau, et l'autre d'un mélange eau-vapeur. Ainsi, plus l'écart de masse volumique entre l'eau et la vapeur est important, plus la circulation est intense.

La pression maximale d'utilisation pratique pour la circulation naturelle est de 180 bars. Dans les chaudières à circulation naturelle, les débits d'eau à l'entrée des circuits sont dimensionnés pour garantir une ébullition nucléée en tout point, assurant ainsi un refroidissement optimal des tubes vaporisateurs [12]. Comme montré dans la Figure I.4, la circulation naturelle est plus efficace lorsque : la pression est faible, la hauteur motrice est élevée (sans toutefois que les pertes de charge ne deviennent excessives), la zone de chauffage est placée dans la partie inférieure des écrans. [12]

B. Circulation forcée

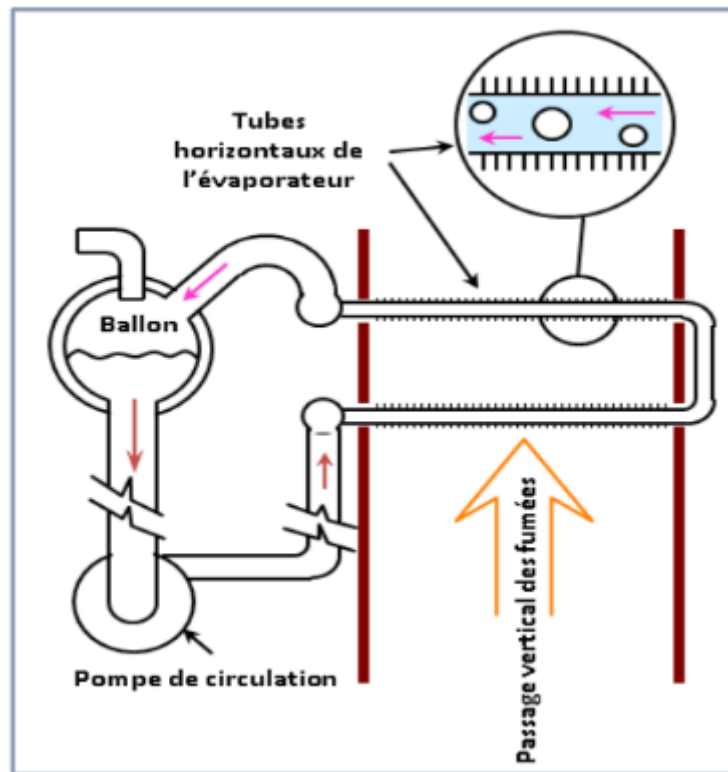


Figure I.5 : Principe de la circulation forcée. [12]

Dans une chaudière à circulation forcée, comme illustré sur la Figure I.5, la circulation de l'eau est maintenue par des pompes d'alimentation. La hauteur de refoulement de ces pompes est calculée en fonction des pertes de charge totales dans les circuits évaporateurs et surchauffeurs. Ce système offre une grande flexibilité dans la conception des circuits, garantissant une circulation continue de l'eau. Dans ce type de chaudière, où l'eau est entièrement vaporisée, les régimes d'ébullition (instable puis stable en film) s'établissent inévitablement en fin de circuit. Il est donc essentiel de vérifier que la vitesse de l'émulsion reste suffisante pour assurer un refroidissement adéquat des tubes. [12]

I.4.2. Chaudière à tube fumé

Les chaudières à tubes de fumée sont parmi les premières machines à vapeur employées dans l'industrie. [13]

Elles se composent d'un grand réservoir d'eau (une cuve cylindrique) traversé par des tubes dans lesquels circule la fumée chaude. Le transfert de chaleur s'effectue principalement par convection entre les gaz de combustion circulant dans les tubes et l'eau contenue dans la cuve[14]. Dans ce modèle de chaudière, les fumées de combustion circulent à travers des

tubes droits installés dans une enveloppe d'eau (calandre) qui constitue le réservoir. Les tubes sont agencés de manière à optimiser le transfert thermique entre les fumées et l'eau, en effectuant plusieurs passages. Ces générateurs produisent de la vapeur saturante, généralement à une pression maximale de 30 bars. [15]

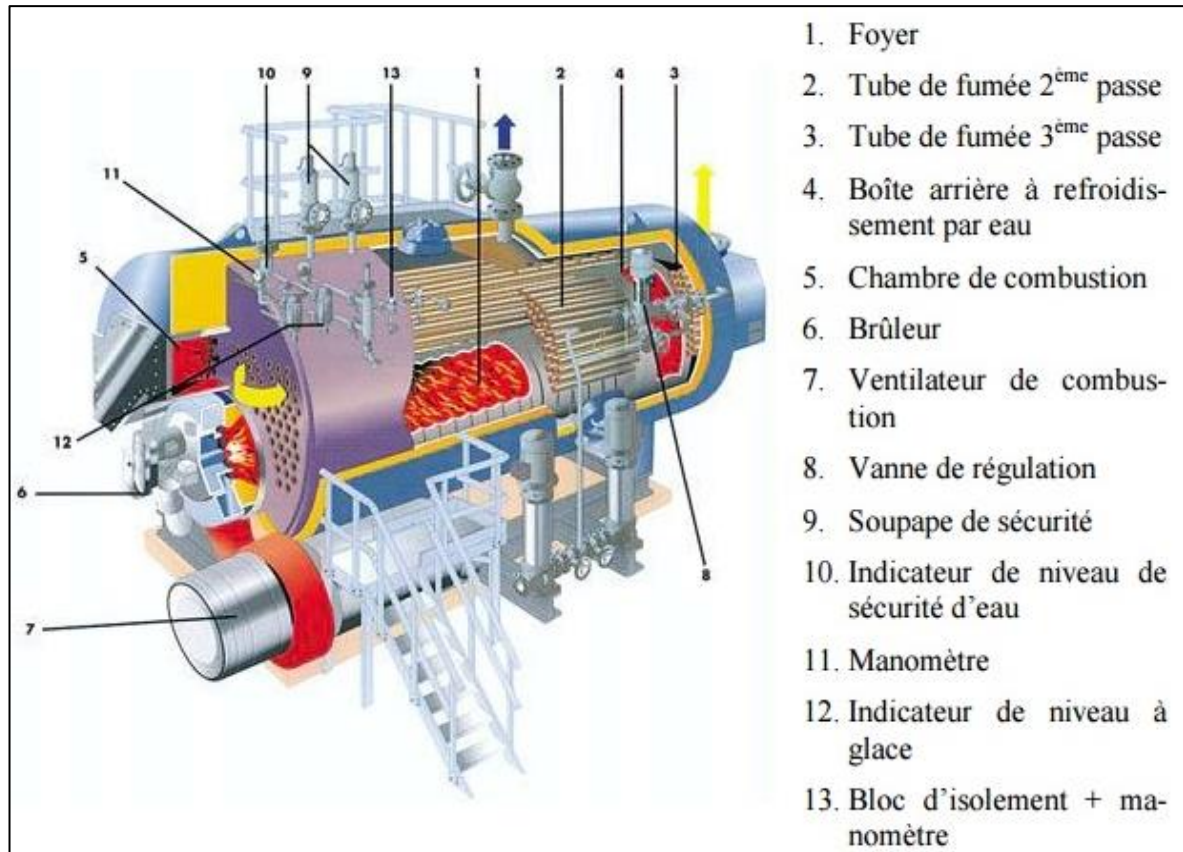


Figure I.6 : Chaudière vapeur à tubes de fumées

I.4.2.1. Principaux avantages des chaudières à tubes de fumée

Les chaudières à tubes de fumée sont privilégiées pour les raisons suivantes :

- Faibles pertes par rayonnement.
- Simplicité d'exploitation et de maintenance.
- Grande capacité en eau, idéale pour les applications de chauffage.
- Installation sans nécessité d'infrastructure spéciale.
- Coût avantageux comparé aux autres types de chaudières.
- Classement fréquent en seconde catégorie, permettant une installation sans chaufferie totalement indépendante.

I.4.2.2. Principaux inconvénients

Les chaudières à tubes de fumée présentent des avantages, mais aussi des inconvénients, notamment :

- Des contraintes plus strictes que celles des chaudières à tubes d'eau.
- Un risque accru en cas d'incident, particulièrement si le tube foyer est concerné.
- Une fiabilité et une durée de vie inférieures à celles des chaudières à tubes d'eau.

I.4.3. Comparaison des performances des deux types de chaudières

Plusieurs facteurs influencent le choix d'une chaudière. Le tableau I.1 compare les deux modèles les plus courants : les chaudières à tubes de fumée et celles à tubes d'eau :

Propriété	Chaudières à tubes de fumée	Chaudières à tubes d'eau
Mise en route (à puissance équivalente)	Lente (grand volume d'eau à chauffer)	Rapide
Adaptation aux changements de régime	Médiocre (inertie importante)	Bonne
Surface de chauffe	Moyenne	Elevée
Sécurité	Médiocre	Bonne
Encombrement	Faible	Fort
Prix	Limité	Elevé
Applications usuelles <ul style="list-style-type: none"> • Puissance • Débit • Timbre (pression max. d'utilisation) 	<ul style="list-style-type: none"> • Moyennement élevée • 1.5 à 25 t/h • 10 à 20 bars 	<div>□ □ Importante</div> <ul style="list-style-type: none"> • 4 à 200 t/h • 90 à 100 bar (en circulation naturelle) et jusqu'à 225 bar (circulation forcée)

Tableau I.1: comparaison des performances entre les chaudières à tubes de fumées et les chaudières à tubes d'eau. [16]

I.5. Mécanisme de la chaudière

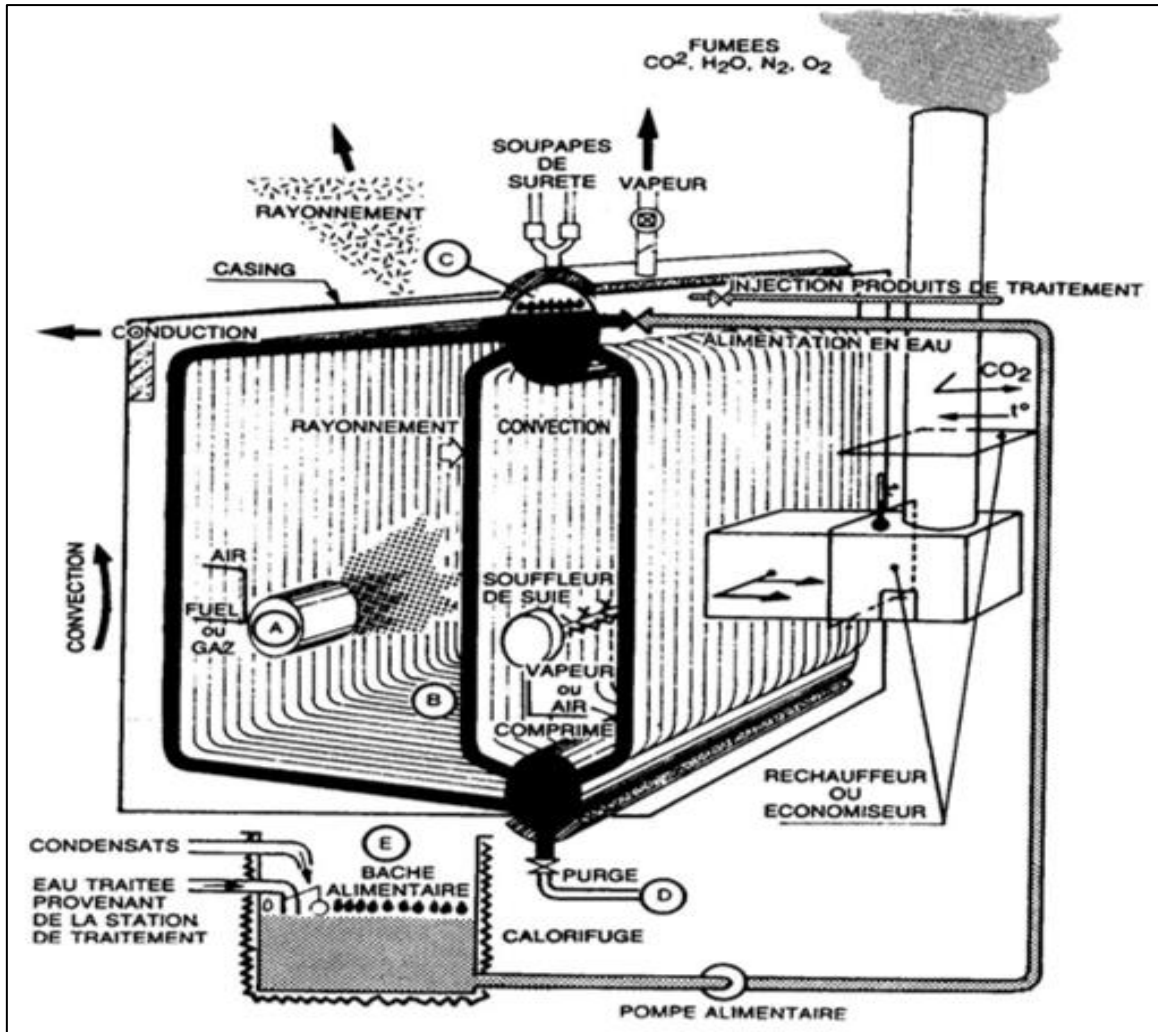


Figure I.7 : Vue générale des approvisionnements et des mécanismes de la chaudière.

I.6. Présentation des composants d'une chaudière

I.6.1. Ballon de chaudière

I.6.1.1. Ballon de vapeur supérieur

Le ballon est l'élément principal de la chaudière. Il reçoit le mélange eau-vapeur provenant des tubes d'écran et des faisceaux vaporisateurs. Ce gros cylindre horizontal (**Figures I.8**), à parois épaisses et situé dans la partie supérieure de la chaudière, remplit plusieurs fonctions essentielles :

- Séparer l'eau et la vapeur contenues dans l'émulsion.
- Équilibrer les pressions entre l'eau et la vapeur en maintenant un niveau d'eau constant.
- Injecter l'eau d'alimentation dans le circuit évaporateur.

- Distribuer efficacement l'eau vers les tubes de descente, en limitant l'entraînement de vapeur.
- Introduire et diluer les produits de traitement de l'eau de la chaudière.
- Permettre l'extraction de déconcentration. [17]

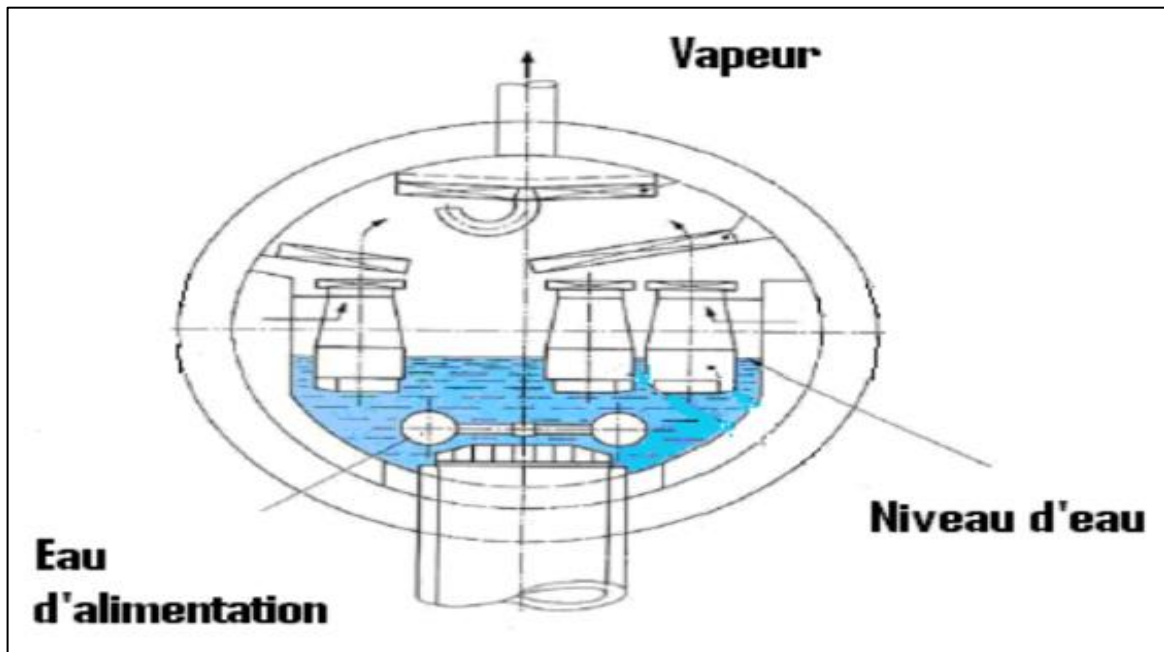


Figure I.8 : Coupe du ballon de vapeur supérieur de chaudière. [12]

I.6.1.2. Ballon inférieur

Le ballon inférieur assure l'alimentation en eau liquide de l'ensemble des tubes où l'eau, soumise à une source de chaleur, subit une vaporisation partielle avant de remonter vers le ballon supérieur. De forme cylindrique et constitué d'une enveloppe métallique, ce ballon a pour fonction principale de collecter l'eau provenant des tubes descendants, puis de la redistribuer vers les tubes vaporisateurs. Il joue également un rôle secondaire de

décantation, permettant la séparation des particules solides telles que les sels et autres impuretés. Ce réservoir est entièrement rempli 100% d'eau.

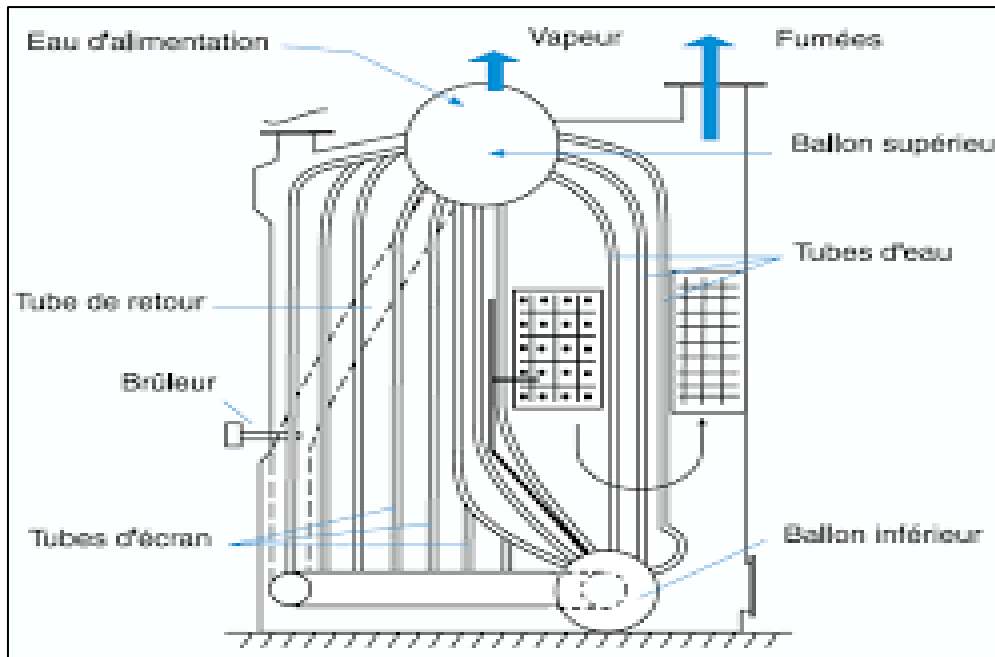


Figure I.9 : Schéma du ballon inférieur et supérieur de la chaudière.

I.6.2. Chambre de combustion

Il s'agit d'une enceinte cylindrique conçue pour la combustion du carburant, équipée de tubes écrans vaporisateurs. Son rôle principal est d'assurer une combustion optimale, garantissant sécurité, efficacité énergétique (rendement) et facilité d'entretien. Cette chambre peut parfois fonctionner avec un ou plusieurs combustibles, utilisés seuls ou en mélange, contribuant ainsi de manière significative aux transferts thermiques au sein de la chaudière. Une combustion à haute température est généralement souvent préférée. Répartition de l'énergie thermique, la chaleur générée par la combustion se répartit de la manière suivante:

- Énergie transférée au fluide via les parois de la chambre.
- Chaleur évacuée par les fumées en sortie de foyer.
- Pertes thermiques externes à travers les parois calorifugées (généralement négligeables, de l'ordre de 0,2%). [14]

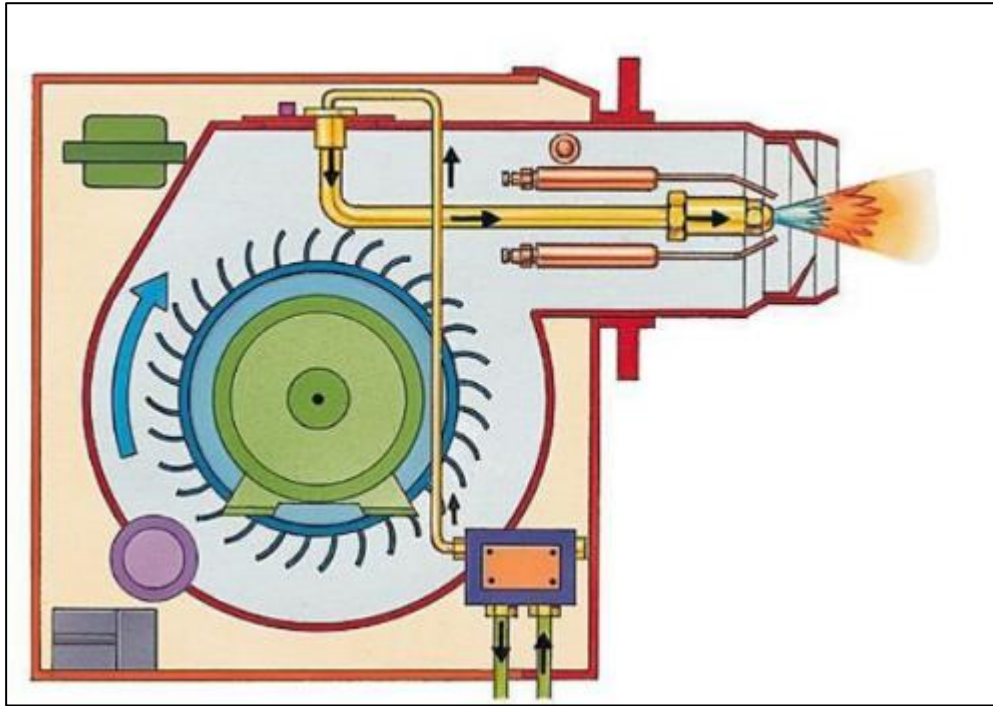


Figure I.10 : Bruleurs dans la chambre de combustion. [18]

I.6.3. Économiseur

Il s'agit d'un échangeur de chaleur à tuyauterie en serpentin, situé en aval du circuit des gaz de combustion. Son rôle est de récupérer une partie des calories résiduelles contenues dans ces gaz afin de préchauffer l'eau d'alimentation. Cela permet de réduire l'énergie nécessaire à sa vaporisation dans les tubes écrans. L'économiseur joue un rôle crucial lors du démarrage de la chaudière, grâce à sa surface d'échange importante et à son coefficient de transfert thermique élevé. Il agit également comme séparateur entre l'eau chaude de la bûche alimentaire et l'écran vaporisateur froid. Le transfert de chaleur dans l'économiseur s'effectue principalement par convection. [12]

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



Figure I.11 : Économiseur de chaudière

I.6.4. Brûleur

C'est un composant mécanique chargé de générer de la chaleur en mélangeant un combustible avec un comburant (air), ce qui provoque une combustion. Son rôle est essentiel dans la qualité de cette combustion, influençant ainsi la quantité de polluants ou de résidus imbrûlés rejetés dans les fumées. [19]

Le brûleur a généralement deux fonctions principales :

- Mélanger le combustible et le comburant dans des proportions définies (par exemple, selon un ratio air-gaz précis, parfois avec un léger excès d'air).
- Assurer une combustion optimale du mélange (allumage, stabilisation de la flamme et combustion complète).

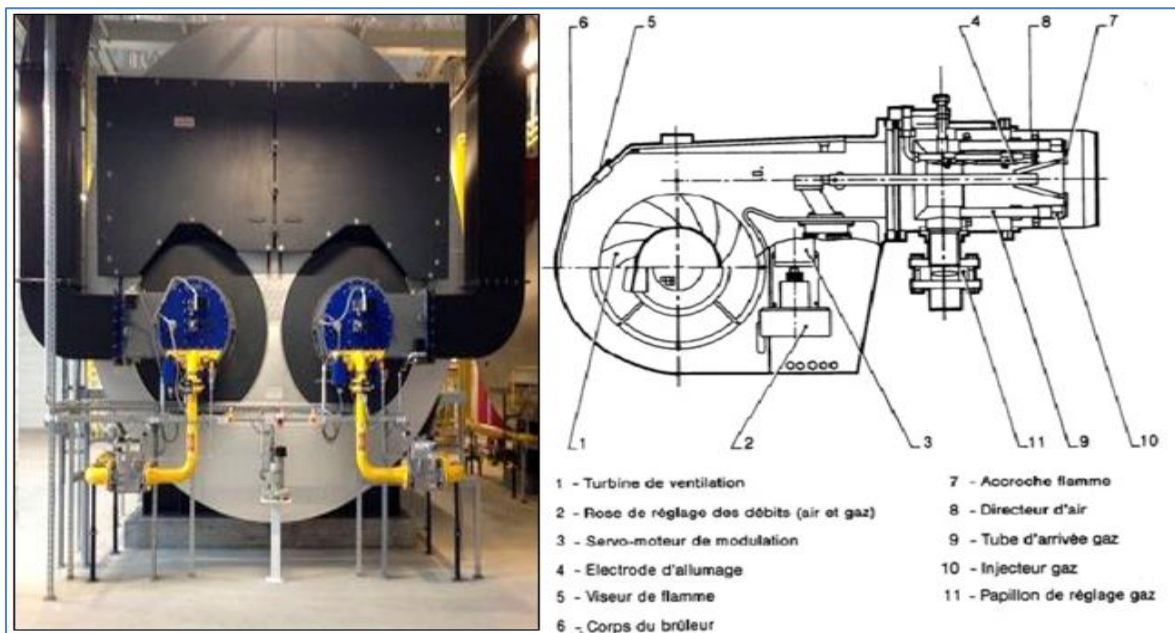


Figure I.12 : Deux Brûleurs et leur schéma dans la chambre de combustion.

I.6.5. Ventilateur de soufflage

Fonctionnement de la chaudière en pression positive avec l'air de combustion insufflé par un ventilateur à tirage forcé. Ce même ventilateur alimente également la soufflante qui approvisionne l'allumeur en air. Il est actionné par un moteur électrique relié au circuit de secours.

L'admission d'air dans le ventilateur est contrôlée pour garantir un mélange air-combustible optimal au brûleur. Un excès d'air insuffisant (moins de 10% pour le gaz ou 15% pour l'essence) entraîne une combustion incomplète. Les résidus d'hydrocarbures non consommés pourraient alors s'enflammer dans la cheminée ou provoquer une explosion, risquant d'endommager gravement l'installation. [20]

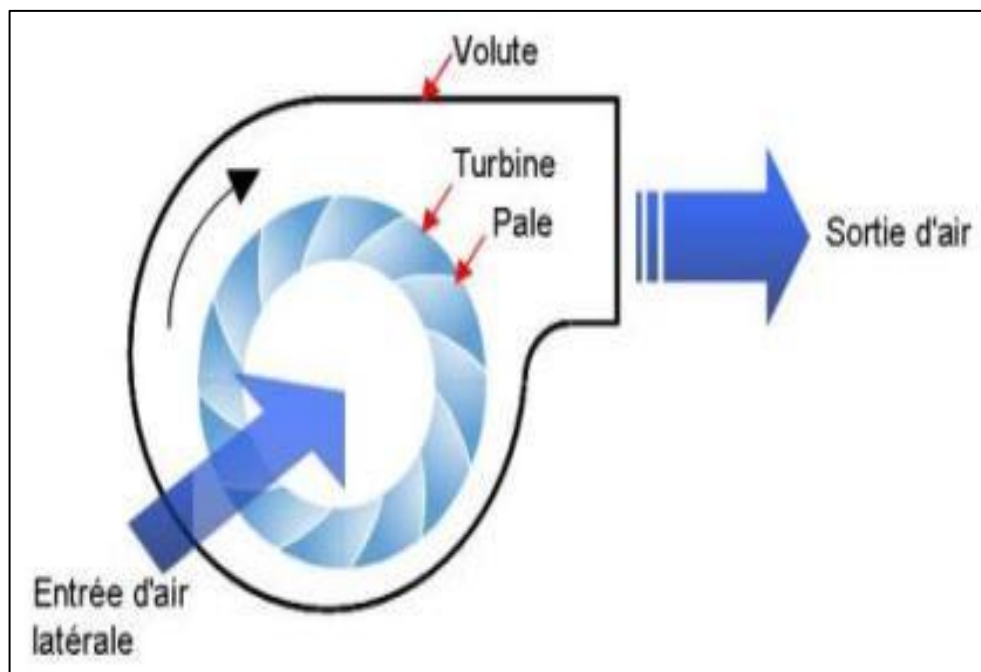


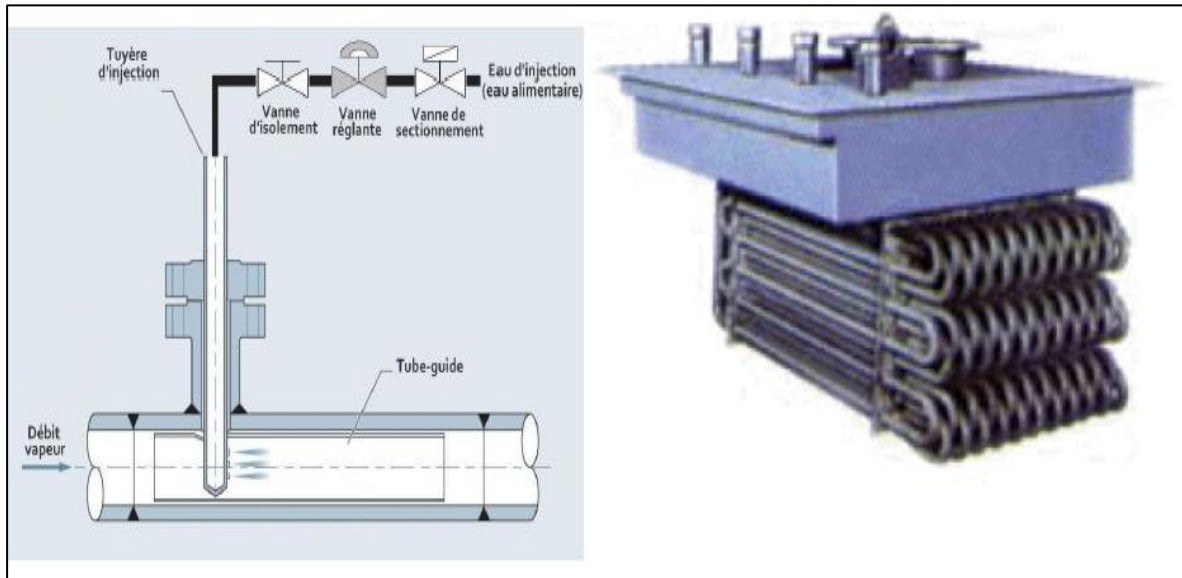
Figure I.13 : Schéma d'un ventilateur.

I.6.6. Les surchauffeurs (SBT), (SHT) et désurchauffeurs

Les surchauffeurs sont des échangeurs thermiques dont la fonction est d'augmenter la température de la vapeur. La vapeur saturée sèche provenant du ballon supérieur est dirigée vers les surchauffeurs (SBT) et (SHT) où sa température est élevée de 274 °C à 415 °C. Elle est ensuite acheminée vers le désurchauffeur, dont le rôle est d'assurer la régulation et la stabilisation de la température à 475 °C. Pour cela, une injection contrôlée d'eau d'alimentation est effectuée afin de limiter l'érosion potentielle, tout en maintenant les conditions thermiques requises. [21]

A-Désurchauffeur

B-surchauffeur

**Figure I.14 :** Présentation du surchauffeur et désurchauffeur.

I.6.7. Cheminée

La cheminée d'une chaudière assure l'évacuation des fumées vers l'extérieur du local chaudière. Cette évacuation peut s'effectuer par convection naturelle, grâce à la différence de densité entre l'air ambiant et les fumées chaudes, plus légères, ce qui crée un tirage naturel vers le haut. Les fumées sont rejetées par une cheminée métallique, après avoir subi un refroidissement. [22]

**Figure I.15 :** Schéma d'une cheminée.

I.7. Pompes

Ce sont des dispositifs permettant d'échanger de l'énergie entre un fluide et un système mécanique. Ils transmettent au fluide soit une énergie potentielle via une augmentation de pression en sortie, soit une énergie cinétique en mettant le fluide en mouvement. Les principes les plus fréquemment utilisés sont les suivants.

I.7.1.1. Pompe d'alimentation

La pompe d'alimentation haute pression doit fournir une pression supérieure à celle régnant dans la chaudière afin d'assurer l'alimentation en continu du circuit. [23]

Le système comprend trois motopompes centrifuges multicellulaires (PPE1, PPE2 et PPE3), dont deux fonctionnent en parallèle tandis que la troisième sert de secours. Leur rôle est de garantir un débit spécifique tout en respectant des conditions de pression prédéfinies.

En Caractéristiques opérationnelles comme montrée sur la figure I.16 :

- Aspiration de l'eau alimentaire à une pression de 1,3 bar et une température de 105°C
- Refoulement : Débit nominal de 150 T/h avec une pression de sortie de 73 bar.
- Débit de dimensionnement : 180 T/h (maximal prévu).
- Débit minimal : 40 T/h par pompe.

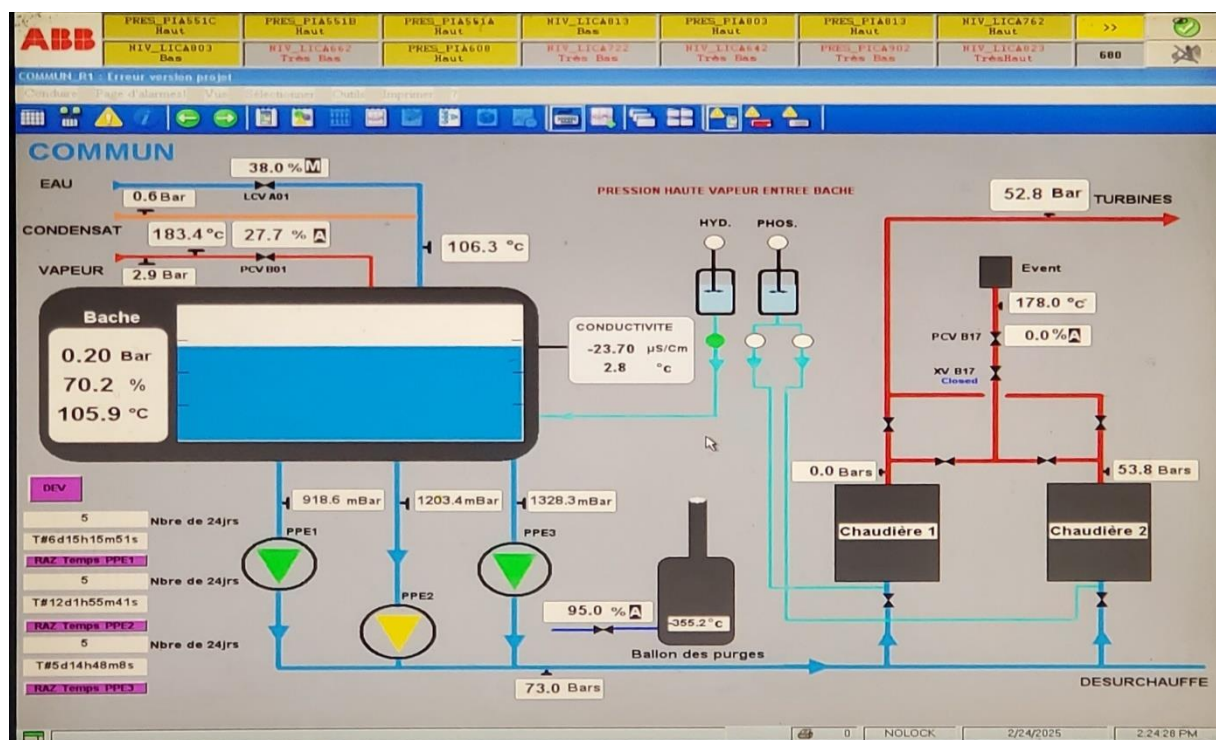


Figure I.16 : Schéma du processus de cogénération Cevital

I.7.2. Pompe et régulateur de pression

La pompe, en plus d'aspirer le gaz naturel, a pour rôle de maintenir une pression suffisante pour permettre la pulvérisation du gaz à travers un régulateur de pression.

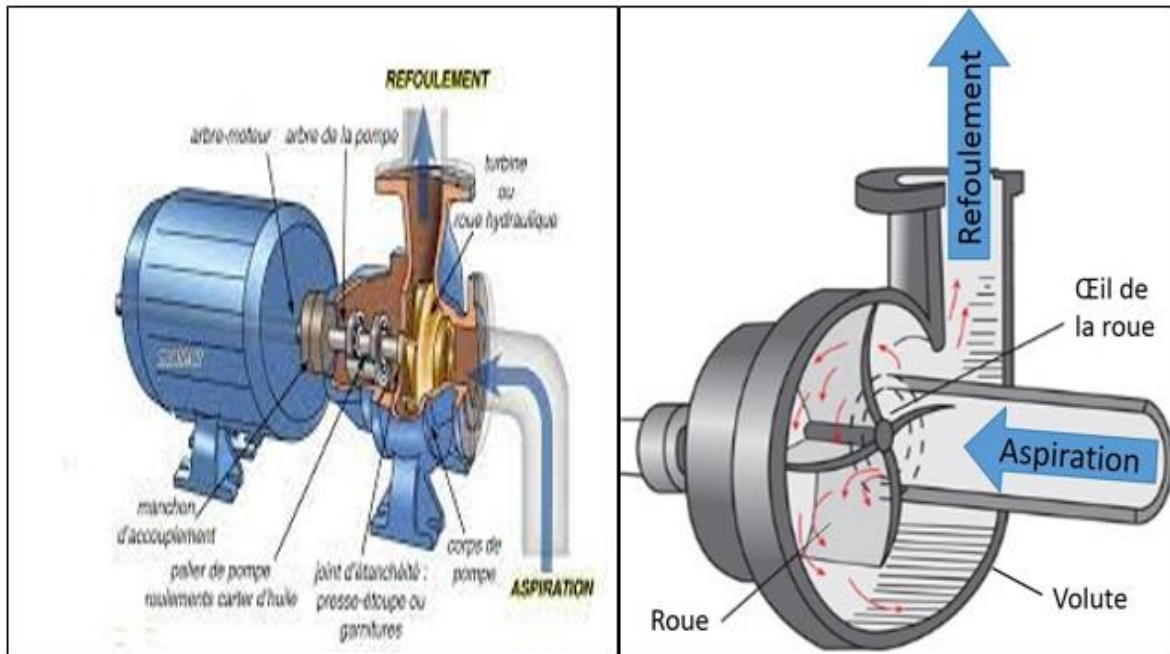


Figure I.17 : Schéma d'une pompe centrifuge

I.8. Bâche alimentaire

La bâche alimentaire est un réservoir cylindrique disposé horizontalement, destiné principalement à l'alimentation en eau ultra pure des deux chaudières. Elle joue également un rôle d'équilibrage entre le débit des condensats de retour et celui de l'eau d'appoint traitée.

D'une capacité de 88 m³, elle est conçue pour fonctionner avec un taux de retour de condensats de 95 % et un apport complémentaire de 5 % en eau traitée.

La régulation de son niveau et de sa pression permet de maintenir la température de l'eau d'alimentation à environ 105 °C. Ce contrôle s'effectue grâce à une mesure de pression dans la bâche, qui pilote la vanne de régulation de l'injection de vapeur.

Installée à 6 mètres au-dessus du sol, cette configuration vise à prévenir le phénomène de cavitation des pompes d'alimentation, causé par la formation de bulles de vapeur pouvant endommager leur fonctionnement. (Voir Figure I.16)

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement d'une chaudière, ainsi que les différents éléments qui la composent cette chaudière. Nous avons insisté sur leur rôle essentiel dans les différents processus énergétiques et examiné les différents types de chaudières, en particulier les chaudières à tubes d'eau et celles à tubes de fumée.

Dans le cadre de ce travail, notre attention se portera principalement sur la chaudière industrielle à tubes d'eau utilisée au niveau de l'entreprise CEVITAL.

Chapitre II
Analyse théorique de la
combustion

Introduction

La production de vapeur dans la chaudière Stein à tube d'eau nécessite une quantité de chaleur suffisante, qui provient ici du gaz naturel. Le calcul d'une chaudière nécessite généralement une bonne compréhension des phénomènes physiques et chimiques associés.

Dans ce chapitre nous avons traitées deux éléments essentiels la combustion et bilan énergétique. Ce dernier est une étape clé pour assurer une efficacité optimale et des performances fiables du système. Elle consiste à déterminer la capacité nécessaire de la chaudière pour répondre correctement aux besoins industriels, en tenant compte des conditions climatiques locales et des variations de la demande en vapeur. Le bilan énergétique permet d'évaluer la performance de la chaudière en analysant l'énergie fournie sous forme de combustible et l'énergie utile produite sous forme de vapeur.

Ce processus aide à identifier les inefficacités, à optimiser les opérations et à maximiser le rendement, tout en réduisant les pertes d'énergie. Un dimensionnement précis est essentiel pour garantir une utilisation économique et durable, permettant ainsi une production efficace de vapeur et d'électricité, tout en respectant les normes environnementales et réglementaires.

II.1. Généralité su la combustion**II.1.1. Définition de la combustion**

La combustion est une réaction chimique au cours de laquelle le carbone et l'hydrogène présents dans les combustibles réagissent avec l'oxygène pour produire du dioxyde de carbone (CO₂), de la vapeur d'eau (H₂O), ainsi que de l'azote (N₂), ce dernier demeurant inerte dans la réaction.

La formule simplifiée est :



Pour que la combustion puisse se produire, trois éléments doivent impérativement être réunis : un combustible, un comburant et une source d'énergie pour l'initier. Cet ensemble est connu sous le nom de triangle du feu.

Dans le cadre d'une chaudière, le but de la combustion est de tirer le maximum d'énergie chimique du combustible. Cette énergie est libérée sous forme de chaleur lors

d'une réaction exothermique, souvent visible par la présence d'une flamme. La chaudière capte ensuite cette chaleur pour générer de la vapeur.

II.2. Pouvoir Calorifique

Le pouvoir calorifique d'un combustible représente l'énergie dégagée sous forme de chaleur lors de sa combustion, rapportée à une unité de masse. Il s'exprime en joules par kilogramme (J/kg), ou en joules par mètre cube (J/m³) lorsqu'il est rapporté à un volume. Dans le secteur du bâtiment, on utilise généralement le kilowattheure (kWh) comme unité d'énergie.

Lorsqu'un combustible (comme le bois, le gaz ou le fioul) brûle, il génère notamment de la vapeur d'eau. Lorsque cette vapeur se condense, elle libère une énergie appelée chaleur latente de liquéfaction.

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) correspond à la quantité totale d'énergie produite par la combustion complète d'un kilogramme (ou d'un mètre cube pour le gaz) de combustible, en incluant la chaleur latente contenue dans la vapeur d'eau issue de la combustion.

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) représente quant à lui l'énergie réellement disponible, c'est-à-dire l'énergie dégagée par la combustion sans récupération de la chaleur latente de la vapeur d'eau. [24]

La relation entre les deux est la suivante :

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

II.3. Les différentes types de combustion

II.3.1. Combustion complète avec excès d'air

Il s'agit d'une combustion complète effectuée avec un **excès** d'air, c'est-à-dire un volume d'air supérieur à celui strictement nécessaire pour une combustion stœchiométrique. Cet excès permet de s'assurer que l'ensemble des composants du combustible réagit avec l'oxygène avant d'être évacué, ce qui évite la formation de monoxyde de carbone (CO).

L'excès d'air requis est généralement moins important pour les combustibles liquides et gazeux que pour les combustibles solides. Ce type de combustion est largement utilisé dans le domaine industriel, notamment dans les chaudières, où il est privilégié pour optimiser le rendement énergétique.

II.3.2. Combustion incomplète par manque d'air

On parle de combustion réductrice (ou combustion avec manque d'air) lorsque la quantité d'air disponible est inférieure à celle requise pour une combustion stœchiométrique. Dans ce cas, tout l'oxygène présent est consommé, si bien qu'aucun oxygène libre ne se retrouve dans les gaz de combustion.

Cependant, ce déficit en oxygène empêche la combustion complète du combustible, ce qui entraîne la formation de monoxyde de carbone (CO) ainsi que de résidus solides non brûlés. [24]

II.4. Conditions nécessaires pour une combustion parfaite

Une bonne combustion repose sur le respect de trois conditions essentielles :

- Une quantité d'air suffisante.
- Un mélange homogène entre l'air et le combustible gazeux,
- Une température suffisante pour entretenir la réaction de combustion.

Le respect de ces conditions est indispensable pour assurer une combustion efficace et complète.

II.4.1. Paramètres de la combustion**Taux de CO₂ et O₂**

La combustion peut être caractérisée en fonction de l'excès d'air (x), de la teneur en oxygène, ou encore de la concentration de dioxyde de carbone (CO₂) dans les fumées. En se basant sur la valeur maximale théorique de CO₂ propre à chaque combustible et sur la mesure du taux d'oxygène résiduel, on peut estimer la concentration en CO₂ selon la formule suivante :

$$\text{CO}_2 \% = \text{CO}_2 \text{ max \%} \times [\text{O}_2 \% / 21]$$

À titre indicatif, la concentration maximale en CO₂ dans les gaz de combustion est de 15,2 % pour le fioul et de 11,9 % pour le gaz naturel. Toutefois, il est très difficile d'ajuster le brûleur pour atteindre ces valeurs sans générer de résidus imbrûlés (comme la suie ou du monoxyde de carbone, CO).

En général, les valeurs cibles de dioxyde de carbone (CO₂) dans les fumées sont les suivantes :

- 12,5 % pour les chaudières au fioul d'une puissance inférieure à 400 kW,

- 13 % pour les chaudières au fioul d'une puissance supérieure à 400 kW,
- 10 % pour les chaudières fonctionnant au gaz naturel.

Taux d'air supplémentaire :

Il correspond à la quantité d'air fournie au-delà de la quantité stœchiométrique nécessaire à la combustion complète d'un combustible. Dans les équipements de chauffage industriels, cet excès se situe généralement entre 2 % et 10 %. Un excès d'air insuffisant peut entraîner une combustion incomplète, produisant des fumées noires, des résidus imbrûlés et un étouffement du foyer. À l'inverse, un excès d'air trop important provoque une baisse de performance énergétique, car une partie de la chaleur est perdue avec les gaz de combustion.

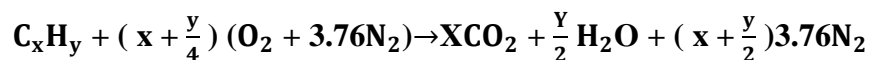
Le facteur lambda (λ) permet de quantifier cet excès d'air. Il se calcule à partir du CO_2 maximal théorique du combustible et du CO_2 mesuré, selon les formules suivantes :

$$\lambda = \text{CO}_2\text{max\%} / \text{CO}_2\% = 21 / (21 - \text{O}_2\%)$$

II.5. Analyse thermochimique de la combustion**II.5.1. Réaction chimique de la combustion**

La combustion est une réaction chimique exothermique au cours de laquelle un combustible réagit avec un comburant, généralement le dioxygène (O_2), pour produire de l'énergie thermique (chaleur).

Lorsqu'un composé hydrocarboné subit une combustion complète, les produits principaux sont le dioxyde de carbone (CO_2) et l'eau (H_2O). Cette réaction libère une quantité significative d'énergie sous forme de chaleur.



Avec :

- C_xH_y : Hydrocarbures présents dans le gaz naturel.
- O_2 : Oxygène, comburant nécessaire à la combustion.
- N_2 : Azote, gaz inerte présent dans l'air.
- CO_2 : Dioxyde de carbone, produit de la combustion.
- H_2O : Eau, également issue de la combustion.

II.6. Types de Combustible

Les combustibles peuvent se présenter sous trois formes principales : solide, liquide ou gazeuse.

- Sous forme gazeuse : butane, propane, gaz naturel (gaz de ville), hydrogène, etc.
- Sous forme liquide : essence, gasoil, huile, kérosène, etc.
- Sous forme solide : bois, papier, carton, textile, matières plastiques, etc.

Dans le contexte industriel en Algérie, le gaz naturel est le combustible le plus couramment utilisé.

II.7. Calculs des transferts d'énergie

- Détermination de la puissance utile,
- Évaluation du rendement prévu,
- Calcul de la puissance nécessaire à fournir à la chaudière via le combustible,
- Estimation du débit massique ou volumique du combustible.

II.7.1. Évaluation des quantités de matière

- Estimation de l'excès d'air requis pour assurer une combustion adéquate, en fonction du type de combustible.
- Détermination du débit d'air nécessaire à la combustion.
- Calcul des débits massique et volumique des fumées produites, ainsi que, si besoin, de la quantité de cendres générées.

II.8. Combustion volumétrique du gaz naturel

Constituant	Formule chimique	Composition volumique en %
Méthane	CH ₄	89,1
Ethane	C ₂ H ₆	6,2
Propane	C ₃ H ₈	0,6
Butane	C ₄ H ₁₀	0,17
Pentane	C ₅ H ₁₂	0,03
Azote	N ₂	3,9

Tableau II.1: composition volumique en % du gaz naturel. [26]

II.8.1. Détermination de L'équation stœchiométrique de la réaction de combustion

Pour brûler complètement, un combustible nécessite au minimum la quantité d'oxygène stœchiométrique :

$$M_{O_2} = 2X_{CH_4} + 3,5X_{C_2H_6} + 5X_{C_3H_8} + 6,5X_{C_4H_{10}} + 8X_{C_5H_{12}} \quad (II)$$

$$M_{O_2} = 2 \times 0,891 + 3,5 \times 0,062 + 5 \times 0,006 + 6,5 \times 0,0017 + 8 \times 0,0003$$

$$M_{O_2} = 2,04245 \text{ kmol d'air. kmol}^{-1} \text{ de combustible}$$

II.8.2. Quantité d'air exploitée dans les conditions réelles

La quantité d'air réellement implique dans le processus :

$$m_l = X \cdot \frac{M_{O_2}}{0,21}$$

$$m_l = 1,42 \times \frac{2,04245}{0,21}$$

$$m_l = 13,8105 \text{ kmol d'air. kmol}^{-1} \text{ de combustible}$$

Masse molaire d'air :

$$m_A = 0,79m_{N_2} \times 0,21m_{O_2}$$

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

$$m_A = 28,84 \text{ kg d'air. kmol mol}^{-1} \text{ de combustible}$$

II.9. Fractions massiques des composants du gaz naturel

La conversion de la composition volumique en composition massique peut s'effectuer à l'aide de la formule suivante [27].

$$\mu_i = \frac{X_i M_i}{\sum X_i M_i} \quad (\text{II.1})$$

μ_i : Fraction massique du composant i (par exemple CH_4 , C_2H_6 , etc.

X_i : Fraction molaire du composant i dans le mélange (souvent donnée).

M_i : Masse molaire du composant i (en g/mol ou kg/mol).

$\sum X_i M_i$: Masse molaire moyenne du gaz naturel (somme pondérée des masses molaire).

Formule chimique	$X_i(\%)$	$M_i(\text{g. mol}^{-1})$	$X_i M_i$	Composition massique en %
CH_4	89,1	16	14,256	81,0359
C_2H_6	6,2	30	1,86	10,5728
C_3H_8	0,6	44	0,264	1,5006
C_4H_{10}	0,17	58	0,0986	0,5604
C_5H_{12}	0,03	72	0,0216	0,1227
N_2	3,9	28	1,092	6,2072

Tableau II.2: Composition massique en% du gaz naturel. [26]

II.9.1. La masse molaire du combustible

On a :

$$m_{\text{comb}} = \sum X_i M_i \quad (\text{II.2})$$

$$m_{\text{comb}} = X_{\text{CH}_4} M_{\text{CH}_4} + X_{\text{C}_2\text{H}_6} M_{\text{C}_2\text{H}_6} + X_{\text{C}_3\text{H}_8} M_{\text{C}_3\text{H}_8} + X_{\text{C}_4\text{H}_{10}} M_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + X_{\text{C}_5\text{H}_{12}} M_{\text{C}_5\text{H}_{12}} + X_{\text{N}_2} M_{\text{N}_2}$$

$$m_{\text{comb}} = 0,891 \times 16 + 0,062 \times 30 + 0,006 \times 44 + 0,0017 \times 58 + 0,0003 \times 72 + 0,039 \times 28$$

$$m_{\text{comb}} = 17,5922 \text{ kg.kmol}^{-1}$$

II.10. Caractéristique du combustible (Gaz naturel) :

Caractéristique du combustible (Gaz naturel)	Unité	Valeurs utilisées par le service technique
Débit-volumique (QV)	$m^3.s^{-1}$	1,75
Pression (P_{Comb})	Pa	$3,9 \times 10^5$
Température (T_{comb})	K	291,15
PCI	kJ/kg	20422,6792
L'excès d'air (X)	-	1,42

Tableau II.3: Caractéristique du combustible (gaz naturel)

Débit quantité molaire de combustible est définit :

$$N_{comb} = \frac{Q_v P_{Comb}}{RT_{Comb}} \quad (II.3)$$

Avec :

Qv : Débit volumique { $m^3.s^{-1}$ }

R : constante molaire des gaz parfaits { $J.mol^{-1}K^{-1}$ }

$$R = 8,314 J.mol^{-1}$$

$$R = 8314 kJ.mol^{-1}$$

$$N_{comb} = \frac{1,75 \times 3,9 \times 10^5}{8314 \times 291,15} = 0,28195 \text{ kmol.s}^{-1}$$

Le débit masse du combustible :

$$M_{\text{comb}} = N_{\text{comb}} \times m_{\text{comb}} = 0,28195 \times 17,5922 \quad (\text{II.4})$$

$$M_{\text{comb}} = 4,96012 \text{ kg.s}^{-1}$$

II.10.1. Débit massique de l'air [25]

$$\dot{m}_A = m_l \times m_A \times N_{\text{comb}} \quad (\text{II.4})$$

$$\dot{m}_A = 13,8105 \times 28,84 \times 0,28195 \text{ kg d'air.s}^{-1}$$

$$\dot{m}_A = 112,2992 \text{ kg.s}^{-1}$$

II.10.2. Débit massique de gaz du combustible

$$M_G = M_{\text{comb}} + \dot{m}_A \quad (\text{II.5})$$

$$M_G = 4,96012 + 112,2992$$

$$M_G = 117,2593 \text{ kg.s}^{-1}$$

II.11. Bilan énergétique de la chaudière

Le bilan énergétique représente toujours une étape initiale essentielle dans la conception d'une centrale thermique ou d'une chaudière. Ils servent à établir le lien entre la puissance thermique et la puissance électrique, tout en permettant de calculer les débits de combustible, d'air, de fumées et de vapeur.

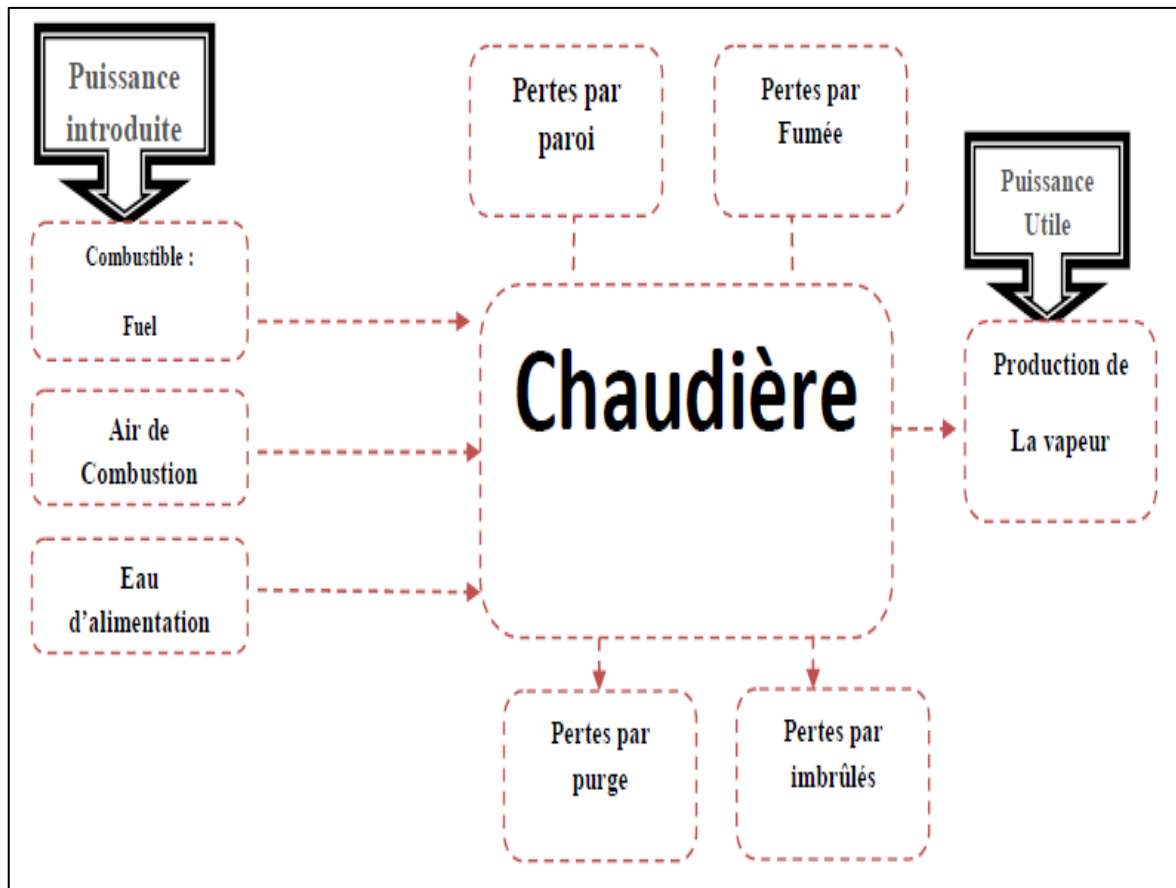


Figure II.1 : Bilan énergétique de la chaudière

II.11.1. Pertes thermique globales

La perte globale correspond à la différence entre la chaleur fournie par le combustible et celle réellement transmise au fluide à chauffer.

$$p_{\text{globales}} = \sum \text{pertes} = P_{\text{fum}} + P_{\text{par}} + P_{\text{pur}} \quad (\text{II.6})$$

Parmi les pertes les plus courantes d'une chaudière, on trouve :

- Les pertes dues aux fumées.
- Les pertes à travers les parois.
- Les pertes liées aux purges.

II.11.2. Pertes par fumée

Ces pertes correspondent à la chaleur entraînée par les gaz chauds s'échappant par la cheminée. Elles sont les plus significatives et représentent environ 5 à 20 % de l'énergie fournie au générateur.

La formule est définie comme suit [28] :

$$P_{\text{fum}} = R \frac{T_{\text{fum}} - T_{\text{air}}}{X \text{CO}_2} \quad (\text{II.7})$$

Où :

- P_{fum} : pertes par les fumées [kW].
- T_{fum} : température des fumées en sortie de chaudière [K].
- T_{air} : température ambiante de la chaufferie [K].
- $X\text{CO}_2$: pourcentage de CO_2 dans les fumées [%].
- R : coefficient lié à la nature du combustible.

II.11.3. Pertes par purges

Ces pertes sont liées à la chaleur sensible contenue dans les purges. Elles peuvent être diminuées grâce à un traitement approprié de l'eau d'alimentation et à un système efficace de récupération des condensats.

Leur importance dépend principalement de la température et du débit des purges, et elles sont généralement évaluées entre 1 % et 5 % [28].

$$P_{\text{pur}} = P_i \frac{y}{100} \quad (\text{II.8})$$

P_i : puissance fournie [kW].

P_{pur} : perte due aux purges [kW].

y : estimation du taux de perte par purge.

II.11.4. Pertes par parois de la chaudière

Ces pertes sont causées par les transferts de chaleur, par convection et rayonnement, entre les parois chaudes de la chaudière et l'air ambiant.

Elles dépendent principalement des dimensions géométriques et des matériaux utilisés pour les parois. Une bonne isolation thermique de la chaudière permet de réduire significativement ces pertes :

II.11.4.1. Pertes par rayonnement

Le rayonnement correspond à l'émission d'ondes électromagnétiques par un corps porté à haute température.

Il s'agit d'un échange thermique entre la surface extérieure et l'environnement ambiant, exprimé par la formule suivante [29] :

$$P_{\text{ray}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S (T_{\text{par}}^4 - T_{\text{air}}^4) \quad (\text{II. 9})$$

Où :

P_{ray} : perte par rayonnement [W].

ε : émissivité du matériau, déterminée à l'aide d'un thermomètre infrarouge ($\varepsilon = 0,95$).

σ : constante de Boltzmann [$5,6697 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$].

S : surface extérieure [m^2].

T_{par} : La température de la paroi [K].

T_{air} : La température de l'air [K].

II.11.4.2. Pertes par convection

La convection constitue le principal mode de transfert d'énergie entre une surface solide et un fluide (liquide ou gaz).

La chaleur échangée par convection entre une paroi solide et un fluide est donnée par l'équation de Newton :

$$P_{\text{Conv}} = h \times S (T_{\text{par}} - T_{\text{air}}) \quad (\text{II. 10})$$

Donc : $P_{\text{par}} = P_{\text{conv}} + P_{\text{ray}}$

Où :

T_{par} : température moyenne de la paroi [K],

T_{air} : température de l'air ambiant [K],

S : surface totale d'échange thermique [m^2],

h : coefficient de convection thermique [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$].

II.12. Nombre de Nusslet

Le nombre de Nusselt, noté Nu , est une grandeur sans dimension utilisée en thermique pour analyser les transferts de chaleur. Il exprime le rapport entre la chaleur transférée par convection et celle transférée par conduction à travers une surface.

Il permet ainsi d'évaluer l'efficacité du transfert thermique dans un fluide comparé à une conduction pure. Il est défini par la formule suivante :

On a :

$$N_u = \frac{h \times D}{\lambda} \quad (\text{II.11})$$

Ainsi :

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

Dans le cadre de notre étude, le nombre de Nusselt est défini par la relation suivante :

$$N_u = C \times Ra^n \quad (\text{II.12})$$

Nu: le nombre de Nusselt défini par [30] :

On a :

$$n=0.25$$

$$c=0.54$$

II.13. Nombre de Rayleigh

Il s'agit d'un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides, qui caractérise le transfert de chaleur dans un fluide. Il est défini par la relation suivante :

$$Ra = Ga \times Pr \quad (\text{II.13})$$

$$Ga = \frac{g \beta \Delta T D^3}{\nu \alpha}$$

Les coefficients de corrélation sont déterminés à partir des relations suivantes : [27]

$$\left[\begin{array}{l} Nu = 1,18 Ra^{0.125} \text{ si } 10^{-3} < Ra < 5 \cdot 10^2 \\ Nu = 0,54 Ra^{0.25} \text{ si } 5 \cdot 10^2 < Ra < 2 \cdot 10^7 \\ Nu = 0,13 Ra^{0.33} \text{ si } 2 \cdot 10^7 < Ra < 10^{13} \end{array} \right.$$

II.14. Nombre de GRASHOF

Le nombre de Prandtl, grandeur sans dimension essentielle en dynamique des fluides, représente le rapport entre la diffusivité de la quantité de mouvement et la diffusivité thermique.

Le nombre de Grashof, noté Gr, est quant à lui défini par la relation suivante :

$$G_r = \frac{\beta \times g \times \Delta T \times D^{-3}}{v^2} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$$

$$\beta = \frac{1}{T_{\text{air}}} = 3.5009 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

II.15. Le rendement de Combustion

Le rendement de combustion est défini par la formule suivante [28] :

$$\eta_{\text{Comb}} = \frac{P_i - P_{\text{fum}}}{P_i} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

P_i : puissance fournie par le combustible.

P_{fum} : pertes par fumées.

II.16. Le rendement thermique

Le rendement η_{utile} d'une chaudière correspond à son rendement instantané en fonctionnement du brûleur. Il représente le rapport entre la puissance fournie par le combustible et la puissance thermique réellement transmise à l'eau de chauffage, et il est défini comme suit [28]:

$$\eta_{\text{utile}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_i} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

P_u : puissance utile de la chaudière, c'est-à-dire la puissance transmise à l'eau de chauffage,

P_i : puissance fournie par le combustible.

II.17. La puissance calorifique dans la chaudière

La puissance fournie par le combustible est définie comme suit [28] :

$$P_a = M_{\text{Comb}} \times \text{PCI} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

M_{comb} : Débit massique de combustible [kg.s^{-1}].

PCI : Pouvoir calorifique inférieur du gaz naturel [kJ.kg^{-1}].

II.18. La puissance utile

L'eau entre dans la chaudière à une température de 105 °C, commence sa vaporisation à T_{vap} , puis, une fois entièrement transformée en vapeur, elle est surchauffée jusqu'à atteindre $T_{surch} = 475$ °C.

La formule de la puissance utile est donnée par la relation suivante :

$$P_{utile} = M_{eau} \times (h_s - h_e) \quad (\text{II. 18})$$

Avec :

M_{eau} : Débit d'eau (kg.s^{-1})

h_s : Enthalpie à la sortie de la pompe (kJ/kg)

h_e : Enthalpie à la sortie de SHT (kJ/kg)

II.19. Relation entre les phases liquide et vapeur

L'analyse du transfert thermique impliquant un changement de phase entre liquide et vapeur, dans le cadre de la conception d'une chaudière ou d'un condenseur, nécessite une bonne compréhension du principe d'équilibre entre les deux phases. Pour en faciliter la compréhension, nous avons brièvement exposé les aspects fondamentaux de l'équilibre vapeur-liquide d'une substance pure.

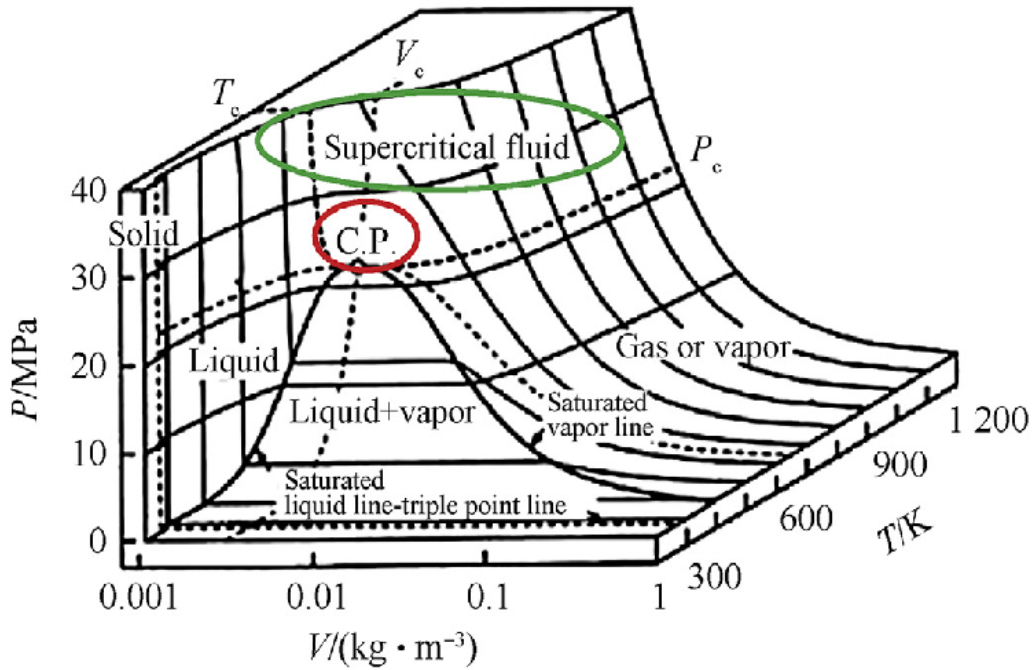


Figure II.2 : Relation entre pression, volume et température. [31]

Le lien entre la pression, le volume et la température d'une substance pure est représenté schématiquement dans la figure II.2, Les différentes phases solides, liquide et vapeur.

La courbe ABCD montre l'évolution de la pression en fonction du volume à une température donnée (T). Dans la zone AB, la substance se trouve à l'état liquide. Dans la région BC, elle est sous forme d'un mélange diphasique liquide-vapeur, en équilibre thermodynamique. Dans la zone CD, elle est entièrement à l'état de vapeur.

Il est possible que le liquide existe à l'état surchauffé pour des pressions inférieures à celle du point B, cette limite étant représentée par le point B'. De même, la vapeur peut exister en état sursaturé, jusqu'à la limite marquée par le point C'.

II.20. Diagramme entropique T-S

Ce diagramme est principalement utilisé pour l'analyse des cycles des machines à vapeur. Il offre une représentation graphique des différentes transformations qu'un fluide peut subir.

Il est structuré comme suit :

- L'axe horizontal (abscisses) représente l'entropie massique SSS , exprimée en kJ/kg.k
- L'axe vertical (ordonnées) indique la température T , exprimée en $^{\circ}\text{C}$.

- Le diagramme est divisé en trois zones distinctes par une courbe appelée courbe de saturation, au sommet de laquelle se situe le point critique, séparant la zone de liquide saturé de celle de vapeur saturée :
- La zone de liquide sous-refroidi se trouve à gauche de la courbe d'ébullition,
- La zone de mélange liquide-vapeur, correspondant au changement d'état, est située à l'intérieur de la courbe de saturation,
- La zone de vapeur (ou vapeur sèche) se situe à droite de la courbe de rosée.

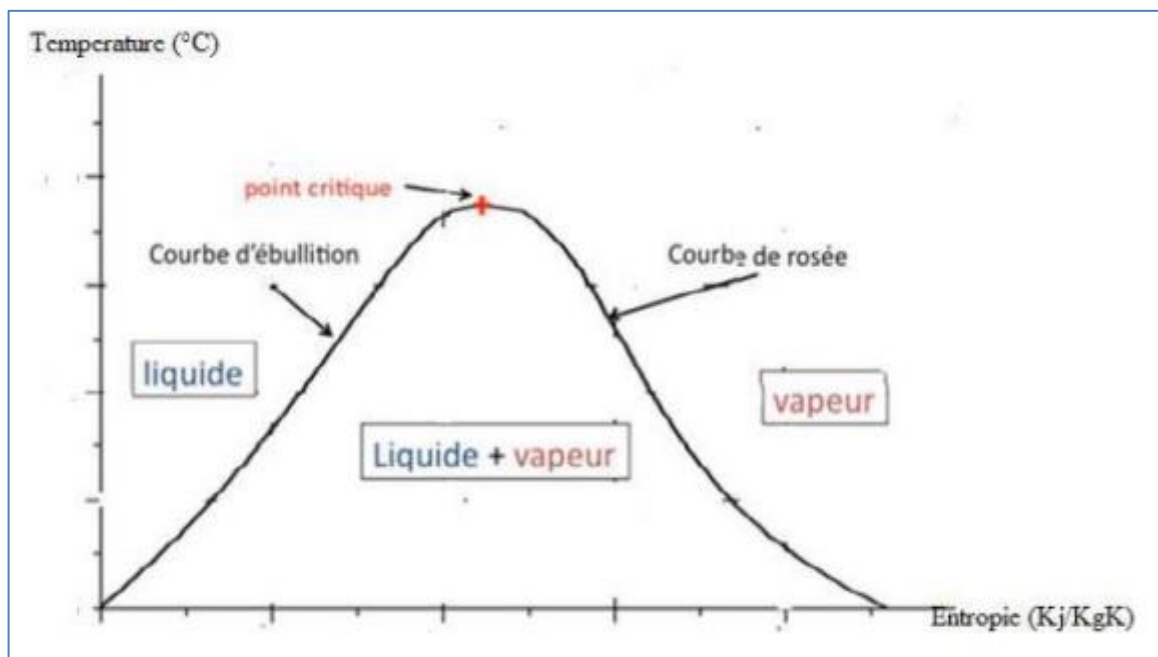


Figure II.3 : Diagramme entropique (T, S) de l'eau. [31]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une analyse détaillée du processus de combustion et procédé au calcul du bilan énergétique de la chaudière. Nous avons examiné les mécanismes de combustion, identifié les éléments influençant son rendement, et établi un bilan énergétique complet pour évaluer les performances de l'équipement.

Le chapitre suivant, qui conclura ce travail, sera consacré à l'application concrète de ces calculs sur la chaudière étudiée.

Chapitre III

Analyse énergétique appliquée à

la chaudière

Introduction

La première étape dans la conception d'une centrale thermique ou d'une chaudière consiste à effectuer des bilans énergétiques précis. Ces bilans permettent d'établir une relation quantitative entre la puissance thermique fournie par la combustion du combustible et la puissance électrique que l'installation est censée produire. Ils sont également indispensables pour dimensionner correctement les équipements, notamment en déterminant les débits nécessaires de combustible, d'air comburant, de fumées et de vapeur.

En pratique, le bilan énergétique permet de :

- Calculer le rendement global de l'installation.
- Évaluer les pertes énergétiques (par les gaz d'échappement, les parois, les imbrûlés, etc.).
- Optimiser le fonctionnement du cycle thermodynamique.

Lorsqu'on s'intéresse aux performances d'une chaudière, il est essentiel de distinguer plusieurs types de rendements. Le rendement de combustion, par exemple, exprime l'efficacité avec laquelle l'énergie contenue dans le combustible est transférée à l'eau ou à la vapeur. Il est souvent évalué lorsque le brûleur fonctionne en régime stabilisé. Ce rendement diffère du rendement global de la chaudière, qui prend en compte l'ensemble des pertes (démarrages, arrêts, pertes par rayonnement, purges, etc.).

L'analyse énergétique d'une installation consiste généralement à déterminer toutes les pertes thermodynamiques et le rendement énergétique de tous les éléments qui la constituent, ainsi que la perte énergétique globale et le rendement énergétique de l'installation.

III.1. Analyse de l'efficacité énergétique de la pompe

Les pompes installées possèdent un rendement isentropique $\eta_s = 80\%$

On a :

$$P_{p1} = 1.3 \text{ bar} = 1.3 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$P_{p2} = 73 \text{ bar} = 73 \times 10^5 \text{ Pa}$$

D'après les informations fournies dans l'annexe :

$$h_1 = 440.281 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$QV = 0.00104744 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$$

D'après l'équation de la thermodynamique :

$$W_{Ps} = h_{2s} - h_1 = \int v dp \quad (\text{III.1})$$

Alors :

$$h_{2s} = h_1 + \int v dp = h_1 + v(P_{P2} - P_{P1})$$

$$h_{2s} = 440.281 + 0.00104744(73 - 1.3)$$

$$h_{2s} = 440.3561 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$\eta_s = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

D'où :

$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_s} \quad (\text{III.2})$$

$$h_2 = 440.281 + \frac{440.3561 - 440.281}{0.8}$$

$$h_{2\text{réel}} = 440.3748 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

- La puissance de la pompe

On a les valeurs des enthalpies tirées d'après les tables thermodynamiques par l'interpolation linéaire, voire l'annexe 01:

$$W_p = M_p(h_2 - h_1) \quad (\text{III.3})$$

Selon les données, on a le débit de la pompe :

$$M_p = 172 \text{ t.h}^{-1}$$

$$M_p = \frac{172 \times 1000}{3600}$$

$$M_p = 47.77 \text{ kg.s}^{-1}$$

Donc:

$$W_p = 47.77 \times (440.3748 - 440.281)$$

$$W_p = 4.484495 \text{ W}$$

III.2. Etude du fonctionnement du brûleur

La puissance « **P** » du brûleur est fonction du débit de gaz « **q_{gaz}** », mesurable au compteur gaz. En première approximation, si l'on néglige les effets de la pression, de la température sur le débit, ainsi que les variations du pouvoir calorifique du gaz distribué, la puissance du brûleur peut être calculée par la formule :

$$P[\text{KW}] = q_{\text{gaz}}[\text{m}^3/\text{min}] \times 60[\text{min/h}] \times 10[\text{kWh/m}^3] \quad (\text{III.4})$$

D'après Les données indiquent une consommation de gaz du brûleur est : 8452 Nm³

L'unité Nm³ (normo-mètre cube) est une unité standard utilisée pour exprimer les volumes de gaz dans des conditions normalisées, permettant des comparaisons cohérentes indépendamment des variations de température et de pression. Les conditions normales de référence sont généralement :

- Température : 0°C (273,15 °K)
- Pression : 1 atm (101,325 kPa)

$$1\text{Nm}^3 \text{ de gaz} \text{-----} > 1.055 \cdot 10^{-27} \text{m}^3$$

$$8452\text{Nm}^3 \text{ de gaz} \text{-----} > X$$

$$X = 8452 \times 1.055 = 8916.86 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$8916.86 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} = 148.614333 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$$

Alors :

$$P = 148.614333 \times 60 \times 10$$

$$P = 89168.5998 \text{ Kw}$$

III.3. Etude de l'économiseur de la chaudière

Selon les données, on a le débit du l'économiseur :

$$M_{\text{Ecn}} = 47.77 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

La puissance du l'économiseur

On a les valeurs des enthalpies tirées d'après les tables thermodynamiques par l'interpolation linéaire, voire l'annexe 01:

$$Q_{Ecn} = M_{Ecn} \times \Delta h \quad (III. 5)$$

$$Q_{Ecn} = M_{Ecn}(h_4 - h_3)$$

$$Q_{Ecn} = 47.77(886.01 - 445.593)$$

$$Q_{Ecn} = 21038.7201 \text{ W}$$

$$Q_{Ecn} = 21.0387201 \text{ Kw}$$

Q_{Ecn} : Le flux thermique de l'économiseur [kW]

M_{Ecn} : Débit massique de l'économiseur [kg.s^{-1}]

III.4. Etude énergétique du ballon

La puissance du ballon

Selon les données on a le débit du ballon :

On a les valeurs des enthalpies tirées d'après les tables thermodynamiques par l'interpolation linéaire, voire l'annexe 01:

$$M_{Bln} = 64.5 \text{ kg.s}^{-1}$$

$$\text{On a : } Q_{Bln} = M_{Bln}(h_6 - h_5) \quad (III.6)$$

$$Q_{Bln} = 64.5(2801.94 - 886.01)$$

$$Q_{Bln} = 123577.485 \text{ W}$$

$$Q_{Bln} = 123.577485 \text{ kW}$$

III.5. Etude énergétique de Surchauffeur basse température

Selon les données on a le débit du SBT :

$$M_{SBT} = 141 \text{ t.h}^{-1}$$

$$M_{SBT} = \frac{141 \times 1000}{3600}$$

$$M_{SBT} = 39.2 \text{ kg.s}^{-1}$$

La puissance de SBT

$$Q_{\text{SBT}} = M_{\text{SBT}} \times \Delta h \quad (\text{II.7})$$

$$Q_{\text{SBT}} = M_{\text{SBT}}(h_8 - h_7)$$

$$Q_{\text{SBT}} = 39.2(3222 - 2801.94)$$

$$Q_{\text{SBT}} = 16466.352 \text{ W}$$

$$Q_{\text{SBT}} = 16.466352 \text{ Kw}$$

III.6. Etude énergétique de Surchauffeur haute température

Selon les données on a le débit du SHT :

$$M_{\text{SHT}} = 150 \text{ t.h}^{-1}$$

$$M_{\text{SHT}} = \frac{150 \times 1000}{3600}$$

$$M_{\text{SHT}} = 41.6 \text{ kg.s}^{-1}$$

La puissance calorifique de SHT

$$Q_{\text{SHT}} = M_{\text{SHT}} \times \Delta h \quad (\text{II.8})$$

$$Q_{\text{SHT}} = M_{\text{SHT}}(h_{10} - h_9)$$

$$Q_{\text{SHT}} = 41.6(3371.08 - 3083.35)$$

$$Q_{\text{SHT}} = 11969.568 \text{ W}$$

$$Q_{\text{SHT}} = 11.969568 \text{ kW}$$

III.7. Puissance calorifique dans la chaudière

C'est une multiplication du pouvoir calorifique inférieur du gaz naturel par son débit massique.

$$P_i = M_{\text{comb}} \times \text{PCI}_{\text{gaz}} \quad (\text{II.9})$$

$$P_i = 4.95836 \times 20422.6792$$

$$P_i = 101298.94 \text{ W}$$

P_i : Puissance introduite

M_{Comb} : Débit massique de combustible [kg.s^{-1}]

PCI : Pouvoir calorifique inférieur de gaz naturel (KJ/Kg).

La puissance utile

$$P_{\text{utile}} = M_{\text{Vap}} \times (h_{10} - h_2) \quad (\text{II.10})$$

$$P_{\text{utile}} = 29.16 \times (3371.08 - 445.593)$$

$$P_{\text{utile}} = 85307.20092 \text{ W}$$

III.8. Calcul du rendement utile de la chaudière avec la méthode directe

$$\eta_{\text{ch}} = \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance introduite}} \quad (\text{II.11})$$

$$\eta_{\text{ch}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_i}$$

$$\eta_{\text{ch}} = \frac{P_{\text{utile}}}{M_{\text{comb}} \times \text{PCI}_{\text{gaz}}}$$

$$\eta_{\text{ch}} = \frac{85307.20092}{101298.94}$$

$$\eta_{\text{ch}} = 0.842133$$

$$\eta_{\text{ch}} = 84.21\%$$

III.9. Etude les déférentes pertes de charge

III.9.1. Pertes thermique par parois

III.9.1.1. Calcule Pertes par convection

Selon les données on a :

- $S = 620 \text{ m}^2$
- $D = 5\text{m}$
- $T_{\text{air}} = 297.05 \text{ K}$
- $T_{\text{paroi}} = 345.15 \text{ K}$

On a :

$$P_{\text{Conv}} = h \times S \times \Delta T \quad (\text{II.12})$$

$$\Delta T = T_{\text{paroi}} - T_{\text{air}} \quad (\text{II.13})$$

La formule pour exprimer le nombre de Nusselt est :

$$\text{Nu} = c \times \text{Ra}^n \quad (\text{II.14})$$

On a la loi de GRASHOF :

Selon les données on a :

- $\Delta T = 48.1$
- $\beta = 3.5009 \times 10^{-3}$
- $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$
- $\nu = 1.516 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- $D = 5\text{m}$

$$\text{Gr} = \frac{\beta \times g \times \Delta T \times D^3}{\nu^2} \quad (\text{II.15})$$

D'où :

$$\text{Gr} = \frac{3.5009 \times 10^{-3} \times 9.81 \times 5^3}{(1.516 \times 10^{-5})^2}$$

Donc :

$$\text{Gr} = 1.1671 \times 10^6$$

Calcule le nombre de Rayleigh :

$$\text{Ra} = \text{Pr} \times \text{Gr} \quad (\text{II.16})$$

$$\text{Ra} = 0.7309 \times 1.1671 \times 10^6$$

$$\text{Ra} = 0.8531 \times 10^6$$

On a :

- $n = 0.25$
- $c = 0.54$

$$\text{Nu} = 0.54 \times (1.3653 \times 10^{10})^{0.25}$$

$$\text{Nu} = 2465.0865$$

D'après l'annexe :

- $P_r = 0.7309$
- $\lambda = 2.514 \times 10^{-2} \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- $D = 5\text{m}$

Donc la formule pour exprime le coefficient de transfert convectif de chaleur est :

$$\text{On a : } Nu = \frac{h \times D}{\lambda} \quad (\text{II.17})$$

$$h = \frac{Nu \times \lambda}{D}$$

$$h = \frac{2465.0865 \times 2.514 \times 10^{-2}}{5}$$

$$h = 0.08266 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

Au final, on obtient :

$$P_{\text{Conv}} = 0.08266 \times 620(345.15-297.05)$$

$$P_{\text{Conv}} = 2465.0865\text{kW}$$

III.9.1.2. Calcul des pertes thermique par rayonnement

$$P_{\text{Ray}} = \varepsilon \times \sigma \times s \times \Delta T^4 \quad (\text{II.18})$$

$$P_{\text{Ray}} = \varepsilon \times \sigma \times s(T_{\text{paroi}}^4 - T_{\text{air}}^4)$$

Selon les données on a :

- $S = 620 \text{ m}^2$
- $T_{\text{air}} = 297.05 \text{ K}$
- $T_{\text{paroi}} = 345.15 \text{ K}$
- $\sigma = 5.667 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$
- $\varepsilon = 0.96$
- $P_{\text{Ray}} = 0.96 \times 5.667 \times 10^{-11} \times 620(345.15^4 - 295.75^4)$

$$P_{\text{Ray}} = 220.6258\text{kW}$$

Finalement :

$$P_{\text{par}} = P_{\text{ray}} + P_{\text{Conv}}$$

$$P_{\text{par}} = 220.6258 + 2465.0865$$

$$P_{\text{par}} = 2685.7123 \text{ kW}$$

III.9.2. Calcul des pertes par fumée

Théorie : Les pertes par fumée sont estimées à 10 % de la puissance totale (100%).

Mesure : L'analyseur indique 10,8 %, soit un écart de +0,8 % par rapport à la théorie.

- Avec symboles :

$P_i = 100\%$ (Puissance totale introduite)

$P_{\text{fumée}} = 10,8\%$ (Pertes mesurées)

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

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

D'après les données on a :

$$\begin{aligned} T_{\text{fum}} &= 499.35 \text{ K} \\ T_{\text{air}} &= 297.05 \text{ K} \\ \text{CO}_2 &= 10.8 \% \end{aligned}$$

On a :

$$P_{\text{fum}} \% = R \frac{T_{\text{fum}} \times T_{\text{air}}}{\% \text{CO}_2} \quad (\text{II.19})$$

$$P_{\text{fum}} \% = 0.593 \frac{499.35 - 297.05}{10.8}$$

$$P_{\text{fum}} \% = 11.10\%$$

$$P_{\text{fum}} = \frac{P_{\text{fum}} \% \times P_i}{100} \quad (\text{II.20})$$

$$P_{\text{fum}} = \frac{11.10 \times 101298.94}{100}$$

$$P_{\text{fum}} = 11244.18234 \text{ kW}$$

III.9.3. Calcul des pertes par purge

$$P_{\text{pur}} = P_i \frac{Y}{100} \quad (\text{II.21})$$

Selon les données on a :

$$P_i = 101298.94 \text{ kW}$$

$$Y = 1.8$$

$$P_{\text{pur}} = 101298.94 \times \frac{1.8}{100}$$

$$P_{\text{pur}} = 1823.38092 \text{ kW}$$

III.9.4. Pertes par Combustion

On a la relation de combustion incomplète qui signifie que son rendement égale à 0.98 (98%), et (2%) sont perdues généralement sous forme de :

- Chaleur dans les fumées évacuées.
- Pertes thermique autour de la chaudière.

$$P_{\text{Comb}} = P_i \times \frac{2}{100} \quad (\text{II.22})$$

$$P_{\text{Comb}} = 101298.94 \times 0.02$$

$$P_{\text{Comb}} = 2025.9788 \text{ kW}$$

III.9.5. Calcul des pertes globales d'une chaudière

$$\sum \text{pertes} = P_{\text{fum}} + P_{\text{pur}} + P_{\text{par}} \quad (\text{II.23})$$

$$\sum \text{pertes} = 11244.18234 + 1823.38092 + 2685.7123$$

$$\sum \text{pertes} = 15753.27556 \text{ kW}$$

III.10. Déterminé du rendement de combustion

$$\eta_{\text{Comb}} = \frac{P_i - P_{\text{fum}}}{P_i} \quad (\text{II.24})$$

$$\eta_{\text{Comb}} = \frac{101298.94 - 11244.18234}{101298.94}$$

$$\eta_{\text{Comb}} = 88.9 \%$$

III.11. Calcul du rendement utile de la chaudière avec la méthode indirecte

$$\eta_{\text{ch}} = 1 - \frac{\sum \text{pertes}}{P_i} \quad (\text{II.25})$$

$$\eta_{\text{ch}} = 1 - \frac{P_{\text{fum}} + P_{\text{Comb}} + P_{\text{par}}}{P_i}$$

$$\eta_{\text{ch}} = 1 - \frac{11244.18234 + 2025.9788 + 2685.7123}{101298.94}$$

$$\eta_{\text{ch}} = 84.24 \%$$

III.12. Calcul du rendement utile de la chaudière avec les perles de purge

$$\eta_{\text{ch}} = 1 - \frac{\sum \text{pertes}}{P_i} \quad (\text{II.26})$$

$$\eta_{\text{ch}} = 1 - \frac{P_{\text{fum}} + P_{\text{pur}} + P_{\text{par}} + P_{\text{Comb}}}{P_i}$$

$$\eta_{\text{ch}} = 1 - \frac{11244.18234 + 1823.38092 + 2685.7123 + 2025.9788}{101298.94}$$

$$\eta_{\text{ch}} = 82.44 \%$$

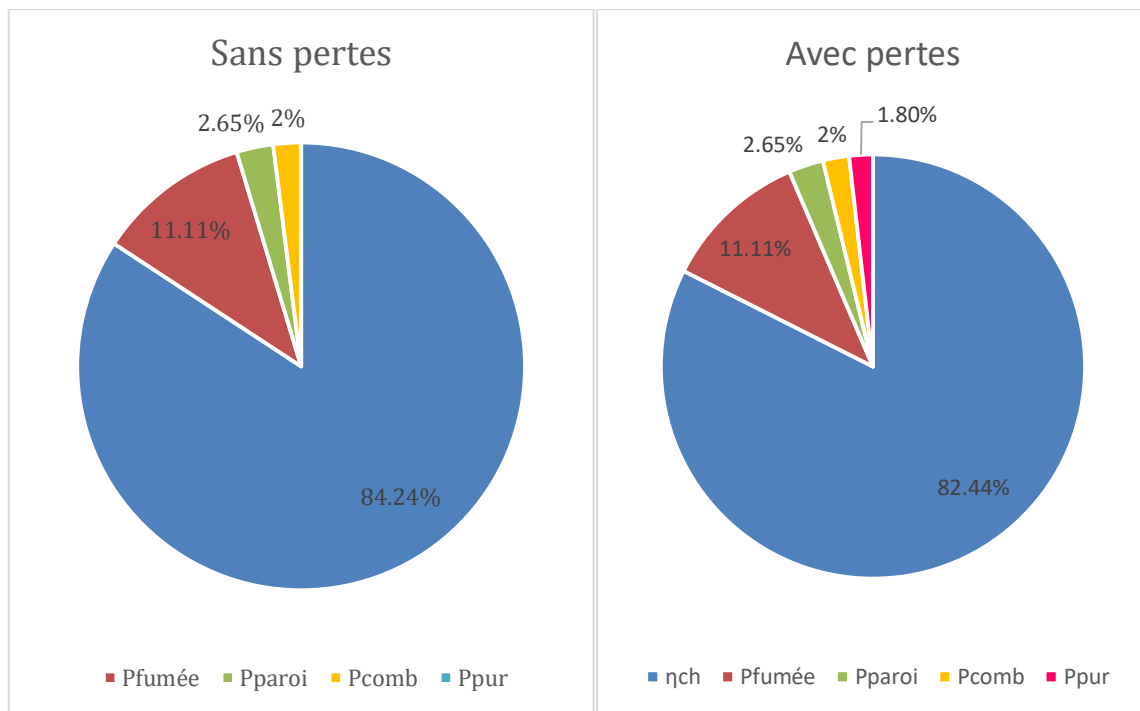


Figure III.1 : Comparaison du rendement thermique avec deux méthodes différentes

La figure permet de comparer le rendement de la chaudière avec deux méthodes différentes. On remarque que le rendement diminue quand il y a des pertes dues aux purges. Cela signifie que plus il y a de pertes, moins la chaudière est efficace. On observe aussi que les pertes par les fumées sont plus importantes que les autres types de pertes. Cela montre que les fumées ont un grand rôle sur la baisse du rendement. Il est donc important de réduire ces pertes pour améliorer le fonctionnement de la chaudière.

Conclusion

D'après les résultats obtenus par les différentes méthodes qu'il a été constaté le rendement actuel de la chaudière est inférieur au rendement théorique attendu. En effet, le rendement calculé en tenant compte de l'ensemble des pertes (fumées, parois, purges et combustion) est de 82,44 %, tandis que le rendement sans les pertes dues aux purges est légèrement supérieur, atteignant 84,24 %. Par la méthode des puissances, un rendement similaire de 84,21 % a été obtenu.

Après les calculs nous avons trouvé que des pertes par fumées sont plus importantes que les autres pertes, ils arrivent une valeur plus grande que les autres. Cette valeur montre que les pertes par fumées ont une grande influence sur le rendement de la chaudière, qu'elles peuvent provenir d'un excès d'air excessif, cela est dû aux raisons suivantes :

- Un mauvais réglage au niveau du brûleur.
- Des problèmes d'entretien tels qu'une mauvaise distribution de l'air ou une mauvaise pulvérisation du fioul.

Une chaudière encrassée: les dépôts internes (tartres) et externes (suies) qui limitent le transfert de chaleur entre l'eau de la chaudière et les fumées

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans ce travail de fin d'étude, nous avons étudié le fonctionnement d'une chaudière haute pression à tubes d'eau, nous concentrons sur le cas réel de celle utilisée dans l'entreprise CEVITAL. Nous avons commencé par comprendre les différents composants de la chaudière et leur rôle dans la production de chaleur à partir de la combustion.

Ensuite, nous avons analysé en détail le processus de combustion et effectué le calcul du bilan énergétique. Cela nous a permis de mieux comprendre les facteurs qui influencent le rendement de la chaudière, comme les pertes de chaleur et la qualité de la combustion. Cette diminution du rendement est liée au transfert de chaleur faible par rapport au design à l'intérieur des tubes, ce qui est expliqué que la diminution du rendement de la chaudière fait surtout de carbone, qui peut se former quand un combustible (comme le charbon ou le fioul) ne brûle pas complètement. Dans une chaudière, il peut se coller sur les parois à l'intérieur. Ce dépôt gêne le bon fonctionnement de la chaudière, car il ralentit la transmission de la chaleur.

Ainsi, grâce à l'application de différentes méthodes de calcul, nous avons déterminé que le rendement actuel de la chaudière est inférieur au rendement théorique. Les pertes les plus importantes proviennent des fumées, souvent causées par un excès d'air, un mauvais réglage du brûleur, un manque d'entretien, ou encore l'encrassement de la chaudière.

Enfin, nous proposons quelques solutions pour améliorer le rendement de la chaudière :

Optimisation de la combustion par exemple Réglage précis du brûleur pour ajuster le débit d'air et de combustible pour obtenir un bon rapport air/carburant et éviter l'excès d'air.

Utilisation de systèmes de régulation automatique pour Installer des contrôleurs de combustion en temps réel (analyseurs d'oxygène ou de CO₂) pour optimiser en continu les paramètres de combustion.

Amélioration de l'entretien par exemple nettoyage régulier des surfaces d'échange thermique pour enlever les dépôts de suie sur les parois côté fumées.

Récupération de chaleur par exemple installation d'un économiseur pour récupérer la chaleur des fumées pour préchauffer l'eau d'alimentation de la chaudière et utilisation d'un préchauffeur d'air : Chauffage l'air de combustion avec les gaz de fumées pour réduire la consommation de combustible.

Conclusion Générale

Réduction des purges par exemple optimisation de la gestion de la purge pour purger uniquement lorsque nécessaire pour éviter les pertes d'eau chaude et d'énergie.

Traitement de l'eau par pour améliorer la qualité de l'eau d'alimentation pour limiter la formation de dépôts et ainsi réduire le besoin de purges fréquentes.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] : I. ABID, F.KERROUCHE : « Dimensionnement, Automatisation et Supervision des auxiliaires de deux Groupes Turbo-alternateurs au sein de l'entreprise CEVITAL », Mémoire de master en Automatisme industrielle et électromécanique, Université Abderrahmane Mira.
- [2] : D. HARKAT, M. BOURDACHE : « Etude et redimensionnement de la boucle moyenne tension du complexe CEVITAL », Mémoire de master en électrotechnique option réseaux électriques, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2016 / 2017, 86 pages.
- [3] : JEAN CLAUDE. S. « Nouvelles technologies de l'énergie : stockage a émission réduite», Edition hermés, 2007.
- [4] : S. Joël, - A quoi Sert la Cogénération -, Enerpresse Forum, Dalkia, 16 Septembre (2008).
- [5] : T. Geoffrey, - Une Vue d'Ensemble sur la Production Thermique d'Electricité -,Article Préparé par T. Geoffrey et Wormell, Daniel Berry., SNC-Lavalin à Montréal, CHOC Juin (2007). Agence de l'Efficacité Energétique Québec.
- [6] : Géovanie. TOSSOU, « valorisation de la pille par la conception d'une chaudière à tube d'eau pour l'entraînement d'une turbine à vapeur de 1 kw », université D'aBomey-Calavi (EPAC), page 8/138, 2012/2013.
- [7] : (Guérin, chaudière-Conception, technologie et Exploitation , 2010)
- [8] : Chaudière un article de WIKIPEDIA.
- [9] : Ecole Nationale Supérieure de Pétrole et des Moteurs, formation industrie IFP training « Risques et précautions liés aux matériels, matériels thermique et description des chaudières », 2005.
- [10] : Belkadi. Achraf Taki Eddine, « Simulation du Comortement Transitoire d'une Chaudière à Tubes de Fumées- Démarrage à Froid ». Université Larbi Ben M'hidi Oum-El-Bouaghi. 2016/2017.
- [11] : INERIS-DRA-09-102957-01582B, rapport d'étude : Référentiels, normes et guides de Bonnes pratiques pour l'exploitation des chaudières industrielles au gaz 09/08/2010.
- [12] : Thèse de doctorat « étude numérique du transitoire accidentel d'une chaudière industrielle par le cde relap5/mod3.2 » universitéconstantine 1 année.

Références bibliographiques

- [13] : Christophe. A, « Chaudières à vapeur à combustible ». Enseignant de BTS CIRA Lycée Pilote Innovant », Édition du 2007.
- [14] : Cheridi. A. L, « Etude Numérique du transitoire accidentel d'une chaudière industrielle par le code Relap5/Mod3.2 », Université Constantine 1,2013.
- [15] : Etude d'une chaudière industrielle à haute pression et du circuit de vapeur d'eau. Houai Yousef PFE (Ingéniorat) chimie industrielle Université USTO 1992.
- [16] : Mehdi, A. Mémoire de master. « Influence du milieu et la qualité d'eau sur le comportement électrochimique de deux nuances d'acier au carbone » Université de Skikda, 2018.
- [17] : Norme AFNOR (2015). Chaudières à vapeur – Fonctionnement et composants. Paris : AFNOR Éditions.
- [18] : rapport de projet fin d'étude « Étude de la modernisation de la chaine de régulation de la température de vapeur à la sortie des surchauffeurs des chaudières de la Centrale Thermique de Jerada.
- [19] : Baukal, C. E. The John Zink Hamworthy Combustion Handbook: Volume 3 – Applications. CRC Press (2013).
- [20] : Formation industrie Sonatrach, « chaudières industrielles » Institut National de pétrole école de Skikda, 2012.
- [21] : Thermodynamique : (Génie énergétique de Michel Combarous).
- [22] : Abderrahmane. CHABI, Lila. MEKZINE, « Etude thermique d'une chaudière à vapeur 4 Tonnes/Heure de l'ECFERA ». Université Mouloud Mammeri TIZI-OUZOU. Page (33,34/111). 2013/2014.
- [23] : Directives API 674 pour les pompes à gaz et EN 334 pour les régulateurs de pression dans les applications combustibles.
- [24] : Catalogue de la chaudière d'ECFERAL MYRA Bejaia Emballage. 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.

Références bibliographiques

[25] : Pascal BIGOT, cour de combustion industrielle, Université Paul SABATIER de TOULOUSE.

[26] : Pascal. B, « cour de combustion industrielle », Université Paul Sabatier de Toulouse.

[27] : Incropera, F.P., & DeWitt, D.P. (2002). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (5e éd.). Wiley. (Voir la corrélation pour plaque horizontale chauffée, p. ...)

[28] : David.R,- Développement de Piles à Combustion de Type SOFC, Conventionnelles et Mono-Chambres, en Technologie Planaire par Sérigraphie- Thèse Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, spécialité de Génie des Procèdes, 1 Juin(2005).

[29] : L. Borel, - Thermodynamique et Energétique, Volme 2-, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (2008).

[30] : RIAD.A, 2012. Optimisation énergétique des deux chaudières auxiliaire à la centrale thermoélectrique. Mémoire de Master Science Technologie Université sidi Mohamed Ben Abdellah.

[31] : Kapoor, A. (2020). *Study of the Physicochemical Properties of Specialty Carbon Black and Its Catalytic Pyrolysis Performance* [Preprint]. ResearchGate.

[32] :Kaboldy. (2012, 26 juin). Water/Steam T-s (temperature-entropy) diagram [Svg]. Wikimedia Commons. Licence CC BY-SA 3.0

Annexes

Annexe 01

		Entrée	Sortie
Pompe	Pression (bar)	1,3(Tsat=107,109°C)	73(Tsat=288,682°C)
	Température(°C)	105	105
	Etat physique	Liquide saturée	Liquide Comprimé
	Enthalpie (KJ/kg)	440,281	445,593
	Entropie(KJ/kg.K)	1,36334	1,35756
	Volume massique (m ³ /kg)	0 ,00104744	0,00104274
	Masse volumique (kg/m ³)	954,709	958,09
		Entrée	Sortie
Economiseur	Pression (bar)	73(Tsat=288,682°C)	73(Tsat=288,682°C)
	Température(°C)	105	207
	Etat physique	Liquide Comprimé	Liquide Comprimé
	Enthalpie (KJ/kg)	445,593	886,01
	Entropie(KJ/kg.K)	1,35756	2,38735
	Volume massique (m ³ /kg)	0,00104374	0,00116185
	Masse volumique (kg/m ³)	958,09	860,694
		Entrée	Sortie
Ballon	Pression (bar)	73(Tsat=288.682°C)	56(Tsat=271,12°C)
	Température(°C)	207	274
	Etat physique	Liquide Comprimé	Vapeur Saturée
	Enthalpie (KJ/kg)	886,01	2801,94

Annexes

Ballon	Entropie(KJ/kg.K)	2,38735	5,94655
	Volume massique (m^3/kg)	0,00116185	0,0354713
	Masse volumique (kg/m^3)	860,694	28,1918
		Entrée	Sortie
SBT	Pression (bar)	56(Tsat=271,12°C)	56,7(Tsat=271,918°C)
	Température(°C)	274	415
	Etat physique	Vapeur Surchauffée	Vapeur Surchauffée
	Enthalpie (KJ/kg)	2801,94	3222
	Entropie(KJ/kg.K)	5,94655	6,63154
	Volume massique (m^3/kg)	0,0354713	0,0519743
	Masse volumique (kg/m^3)	28,1918	19,2403
		Entrée	Sortie
SHT	Pression (bar)	56,4	54
	Température(°C)	361	475
	Etat physique	Vapeur surchauffée	Vapeur sèche
	Enthalpie (KJ/kg)	3083,35	3371,08
	Entropie(KJ/kg.K)	6,42384	6,86052
	Volume massique (m^3/kg)	0,0465938	0,0608505
	Masse volumique (kg/m^3)	21,4621	16,4337

Annexe 02

948

PROPERTY TABLES AND CHARTS

TABLE A-9

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^{-6}	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, 198; 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.

الملخص

يتعلق مشروع نهاية الدراسة هذا بإجراء الحصىلة الطاقوية لغلالية بخارية، ويرتكز على تحليل مفصل لتدفقات الطاقة الداخلة والخارجة بهدف تقييم كفاءتها الحرارية. تتضمن الدراسة نمذجة ظواهر الاحتراق وتوليد البخار، بالإضافة إلى تحديد وفهم وفقدان الحرارة.

الهدف الرئيسي هو تحسين الأداء الطاقوي للغلالية من خلال اقتراح حلول لتقليل الفواقد الحرارية وتحسين مردودها العام.

الكلمات المفتاحية: غلالية. الكفاءة الطاقوية. الديناميكا الحرارية. الحمل الحراري. انتقال الحرارة. الهندسة الطاقوية. الاحتراق.

Abstract

This final year project involves carrying out the energy balance of a boiler. It revolves around a detailed analysis of the incoming and outgoing energy flows, with the aim of evaluating its thermal efficiency. The study includes the modeling of combustion and steam generation phenomena, as well as the identification and quantification of thermal losses.

The main objective is to optimize the boiler's energy performance by proposing solutions to reduce losses and improve its overall efficiency.

Keywords: Boiler. Energy efficiency. Thermodynamics. Convection. Heat transfer. Energy engineering. Combustion.

Résumé

Ce projet de fin d'études consiste à réaliser le bilan énergétique d'une chaudière. Il s'articule autour d'une analyse détaillée des flux d'énergie entrants et sortants, dans le but d'évaluer son efficacité thermique. L'étude comprend la modélisation des phénomènes de combustion et de génération de vapeur, ainsi que l'identification et la quantification des pertes thermiques.

L'objectif principal est d'optimiser les performances énergétiques de la chaudière en proposant des solutions pour réduire les pertes et améliorer son rendement global.

Mots clés : Chaudière. Rendement énergétique. Thermodynamique. Convection. Transfert de chaleur. Énergétique. Combustion.