

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Installations Energétiques Et Turbomachines

Par :

**CHEBAL Aida**

**BOUFADENE Sonia**

**Thème**

---

**Vérification du bilan énergétique de la chaudière haute  
pression, CEVITAL(Bejaia)**

---

Soutenu le 25/06/2024 devant le jury composé de :

M.SAHI A.

Président

M.HAMICI N.

Rapporteur

M.HAMDI M.

Examineur

**Année Universitaire 2023-2024**

# Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Mr. HAMICI N, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail ainsi que notre Co-promoteur Mr. Gadouche pour nous avoir prés en charge lors de notre stage.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*



*Ch. Aída & B. Sonia -*

# Dédicaces

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail*

*A ma mère qui m'a entouré d'amour, d'affection et qui fait tout pour ma réussite.*

*Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance*

*A mon père qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études.*

*A mon frère et mes sœurs.*

*A mon amie Rania qui m'a toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.*

*A ma binôme et sa famille.*

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.*



# *Dédicaces*

*Je dédie cet ouvrage*

*A maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années  
d'études.*

*A ma sœur, mes grands parents et ceux qui ont partagé avec  
moi tout les moments d'émotion lors de la réalisation de ce  
travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout  
au long de mon parcours.*

*A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de  
l'amour et de la vivacité*

*A ma binôme et tous mes amis qui m'ont toujours encouragé et  
à qui je souhaite plus de succès*

 - *B.Sonía* -

# *Sommaire*

# Sommaire

---

## Remerciements

## Dédicaces

## Sommaire

Nomenclature

Liste des tableaux

Liste des figures

**Introduction Générale..... 1**

### Chapitre I

#### Généralités sur les chaudières

I.1. Introduction .....	3
I.2. Définition d'une chaudière.....	3
I.3. Rôle des chaudières industrielles .....	4
I.4. Aspect thermodynamique des chaudières .....	5
I.5. Différents types de chaudières .....	7
I.5.1. Chaudières à tubes de fumées .....	7
I.5.2. Chaudières à tubes d'eau.....	8
I.5.3. Comparaison des performances des deux types de chaudières .....	10
I.6. Circulation d'eau dans les chaudières .....	11
I.6.1. Circulation naturelle.....	11
I.6.2. La circulation forcée.....	12
I.7. Différents composants d'une chaudière .....	13
I.7.1. Description des éléments de chaudière .....	13
I.8. Conclusion.....	15

### Chapitre II

#### Cogénération et description de la chaudière STEIN –CEVITAL-

II.1. Introduction.....	17
II.2. La cogénération.....	17
II.2.1. Histoire de la cogénération .....	17
II.2.2. Principales sources utilisés dans l'installation .....	18
II.2.3. Intérêt de la cogénération.....	19
II.2.4. Impact de la cogénération sur l'environnement.....	19
II.2.5. Différentes technologies de cogénération .....	20
II.2.6. Description de la centrale cogénération CEVITAL.....	21
II.3. Conclusion .....	31

## *Sommaire*

---

### **Chapitre III**

#### **Etude de la combustion et bilan énergétique de la chaudière**

III.1. Introduction .....	33
III.2. Combustion.....	33
III.2.1. Généralité sur la combustion .....	33
III.2.2. Pouvoir Calorifique .....	34
III.3. Paramètres de la combustion .....	34
III.4. Equation générale de la combustion.....	35
III.4.1. Réaction de la combustion.....	35
III.5. Équation stœchiométrique de la combustion du gaz naturel .....	36
III.5.1. Quantité d'air effective.....	36
III.6. Combustible utilisé.....	37
III.6.1. Composition volumique du gaz naturel.....	38
III.6.2. Composition massique du gaz naturel .....	38
III.6.3. Débit masse du combustible .....	39
III.7. Rendement de combustion .....	40
III.8. Bilan énergétique de la chaudière.....	41
III.8.1. Rendement utile.....	42
III.8.2. Pertes globales .....	44
III.9. Conclusion.....	47

### **IV. Chapitre IV**

#### **Application du bilan énergétique de la chaudière**

IV.1. Introduction .....	49
IV.2. Analyse énergétique de la bache .....	49
IV.2.1. Propriétés du fluide à l'entrée et la sortie de la bache.....	49
IV.3. Analyse énergétique des pompes .....	50
IV.4. Analyse du brûleur .....	51
IV.5. Analyse de l'économiseur .....	52
IV.6. Analyse énergétique de ballon de la chaudière .....	53
IV.7. Analyse énergétique de la SBT .....	53
IV.8. Analyse énergétique de la SHT .....	54
IV.9. Analyse énergétique de la chaudière .....	55
IV.9.1. Puissance introduite dans la chaudière.....	55
IV.9.2. Puissance utile .....	55

## *Sommaire*

---

IV.9.3. Différentes pertes .....	56
IV.9.4. Pertes par parois .....	56
IV.9.5. Pertes par fumée .....	58
IV.9.6. Pertes par purge .....	59
IV.9.7. Pertes globales d'une chaudière .....	59
IV.9.8. Rendement de combustion .....	59
IV.9.9. Rendement utile.....	60
IV.9.10. Discussion et analyse des résultats .....	60
IV.10. Conclusion.....	61
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>62</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>64</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>67</b>

## Nomenclature

<b>Symbole</b>	<b>Description</b>	<b>Unité</b>
$C_p$	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'enthalpie de vapeur surchauffe	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
$M_{comb}$	Débit masse du combustible	$\text{kg comb} \cdot \text{s}^{-1}$
$M_{comb}$	Masse molaire des gaz de combustion	$\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$
$M_{ecnm}$	Débit du l'économiseur	$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
$M_{SBT}$	Débit du SBT	$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
$M_{SHT}$	Débit du SHT	$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
$M_B$	Débit de ballon	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
MG	Débit masse de Gaz de combustion	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
ML	Quantité d'air effective	$\text{kmol air} \cdot \text{kmol}^{-1}$
MO2 Stok	La quantité d'oxygène stœchiométrique	$\text{kmol air} \cdot \text{kmol}^{-1} \text{ comb}$
$\dot{m}_A$	Débit masse 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	$\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$
Nu	Nombre de Nusselt	
N	Coefficient de corrélation	
$P_{comb}$	Pression du combustible	Pa

## *Nomenclateur*

---

Pi	Puissance introduite	kW
Pconv	Pertes par convection	kW
Ppur	Pertes par purge	kW
Pfum	Pertes par fumée	kW
Pglob	Pertes globales	kW
Pr	Nombre de Prandtl	
Pray	Pertes par rayonnement	kW
Pu	Puissance utile	kW
Qeconom	Puissance du l'économiseur	kW
Q <sub>SBT</sub>	Puissance du SBT	kW
Q <sub>SHT</sub>	Puissance du SHT	kW
R	Constante molaire des gaz parfaits	J.mol <sup>-1</sup> .K-1
Ra	Nombre de Rayleigh	
S	Surface	m <sup>2</sup>
T <sub>comb</sub>	Température de la combustible	K
Tair	Température d'air	K
Tpar	Température de la par paroi	K
T <sub>comb</sub>	Température de la combustible	K
Ui	fraction massique du composant	
V	Volume	m <sup>3</sup>
V <sub>comb</sub>	Débit-volume du combustible	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>
W <sub>pp</sub>	Puissance de la pompe	kW

## **Lettre grecs**

<b>Symbole</b>	<b>description</b>
$\beta$	Coefficient de dilatation
$\varepsilon$	L'émissivité du matériau
$\lambda$	Conductivité thermique
$\lambda_e$	Facteur d'air
$\nu$	Viscosité cinématique
$\sigma$	Constante de Boltzmann
$\eta$	Rendement

## **Indice et abréviation**

<b>Symbole</b>	<b>description</b>
A	Air
comb	combustible
$\Delta T$	Différent de température
PC	Pouvoir calorifique
PCS	Pouvoir calorifique supérieure
PCI	Pouvoir calorifique inférieure
y	Estimation des pertes par purge

## *Liste des tableaux*

---

### **Liste des tableaux**

<b>Tableau I.1:</b> Comparaison des performances des chaudières .....	11
<b>Tableau III.1:</b> Composition volumique en % du gaz naturel.....	38
<b>Tableau III.2:</b> Composition massique en % du gaz naturel.....	38
<b>Tableau III.3:</b> Caractéristique du combustible (gaz naturel) .....	39
<b>Tableau IV.1:</b> Caractéristiques du fluide à l'entrée et la sortie de la bache.....	49

## *Liste des figures*

---

### Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Chaudière industrielle.....	4
<b>Figure I.2</b> : Rôle de la chaudière .....	5
<b>Figure I.3</b> : Schéma d'état p-V-T, représentatif de tous les états thermodynamiques d'un système à un composant. ....	6
<b>Figure I.4</b> : Chaudière à tube de fumée .....	7
<b>Figure I.5</b> : Schéma de la chaudière à tubes d'eau .....	8
<b>Figure I.6</b> : Différents types de chaudières à tubes d'eau. ....	10
<b>Figure I.7</b> : Principe de fonctionnement des chaudières à convection naturelle circulation naturelle. ....	12
<b>Figure II.1</b> : Schéma de la cogénération .....	18
<b>Figure II.2</b> : Economie d'énergie primaire avec la cogénération.....	20
<b>Figure II.3</b> : Schéma représentant le procès de la cogénération à Cevital .....	22
<b>Figure II.4</b> : Représentation schématique de la bache alimentaire. ....	23
<b>Figure II.5</b> : Schéma fonctionnel de la chaudière .....	24
<b>Figure II.6</b> : Chaîne de régulation automatique. ....	27
<b>Figure III.1</b> : Diagramme de la combustion.....	41
<b>Figure III.2</b> : Bilan énergétique de la chaudière .....	42
<b>Figure III.3</b> : Diagramme de changement de phase de l'eau. ....	43
<b>Figure IV.1</b> : Le bilan énergétique de la chaudière STEIN.....	60
<b>Figure IV.2</b> : Les pertes globales .....	61
<b>Figure IV.3</b> : Situation géographique du Complexe CEVITAL .....	71

# *Introduction Générale*

## *Introduction Générale*

---

Le principe fondamental de la conservation de l'énergie, souvent résumé par l'aphorisme "Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme" de Lavoisier, trouve une application directe et essentielle dans l'étude et l'optimisation des systèmes énergétiques modernes. Ce principe souligne que l'énergie ne peut ni être créée ni détruite, mais seulement transformée d'une forme à une autre.

Dans le contexte industriel, et plus spécifiquement dans le domaine des chaudières à tube d'eau haute pression, cette loi de la thermodynamique devient une pierre angulaire pour comprendre et améliorer l'efficacité énergétique. Les chaudières à tube d'eau haute pression jouent un rôle crucial dans la production de vapeur, utilisée à la fois pour le chauffage et comme source d'énergie pour les turbines et autres équipements industriels. Leur efficacité et leur performance dépendent de la manière dont l'énergie est convertie et transférée au sein du système. Une analyse rigoureuse du bilan énergétique permet non seulement de mesurer la performance actuelle de la chaudière, mais aussi d'identifier les pertes énergétiques et de proposer des améliorations potentielles.

Dans ce Projet de Fin d'Études, nous nous concentrerons sur le calcul du bilan énergétique de la chaudière à tube d'eau haute pression. En appliquant les principes de la thermodynamique et en utilisant des méthodes de calcul précises, nous chercherons à quantifier les différentes formes d'énergie impliquées – de l'énergie chimique du combustible à la chaleur produite et aux pertes thermiques. Cette analyse détaillée nous permettra de fournir des recommandations pour optimiser le rendement de la chaudière, réduire les coûts opérationnels et minimiser l'impact environnemental.

Ce projet se divise en plusieurs parties : une revue des principes théoriques de la thermodynamique et de la combustion, une description détaillée de la chaudière à tube d'eau haute pression étudiée, la méthodologie de calcul du bilan énergétique, les résultats obtenus, et enfin, une discussion des implications de ces résultats et des suggestions d'améliorations possibles.

*Chapitre I*  
*Généralités sur les chaudières*

## **I.1. Introduction**

La vapeur d'eau est utilisée dans la production d'énergie et dans de nombreux processus industriels comme les centrales thermique, centrales nucléaires. L'énergie thermique transférée (source de chaleur) peut être la chaleur dégagée par la combustion (charbon, fioul, gaz naturel, bois) l'électricité par effet Joule ou la fission nucléaire de l'uranium.

Pour créer de la vapeur, l'eau doit être chauffée jusqu'au point d'ébullition, puis suffisamment de chaleur est fournie pour transformer l'eau bouillante en vapeur. Par conséquent, la technologie de production et d'utilisation de la vapeur constitue un aspect important de la technologie de l'ingénierie. Un générateur de vapeur est l'un des appareils utilisés pour générer de la vapeur.

## **I.2. Définition d'une chaudière**

Une chaudière est un réservoir contenant un fluide caloporteur provenant d'un appareil utilisé pour chauffer l'eau et générer de la vapeur lorsque l'eau est chauffée au-dessus de la pression atmosphérique.

Son objectif est de générer et de stocker de l'énergie thermique dans ce fluide et de l'utiliser pour un différent endroit. Le fluide chauffé est acheminé jusqu'au point d'utilisation. Généralement, les chaudières fonctionnent en circuit fermé, le fluide chaud étant expulsé par des tuyaux fixé à sa partie supérieure et, une fois terminé, renvoyé par un autre tuyau fixé à sa partie inférieure refroidissement par circulation.

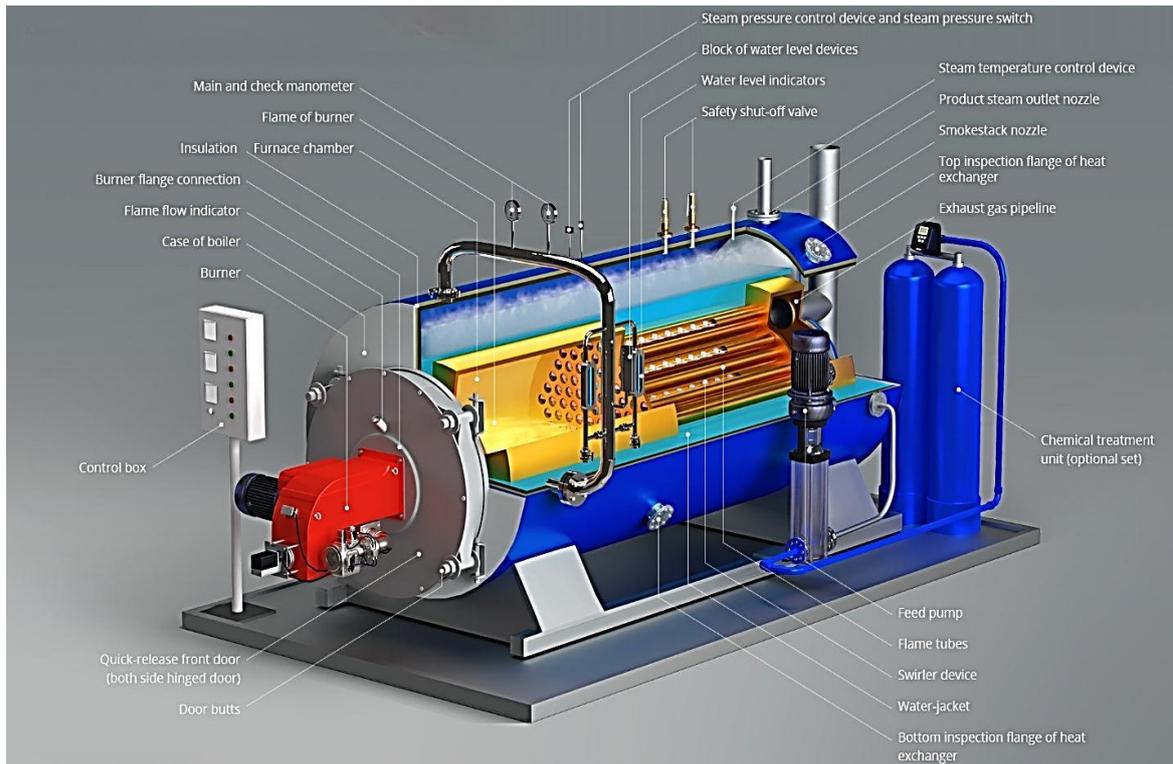


Figure I.1 : Chaudière industrielle

### I.3. Rôle des chaudières industrielles

Le rôle d'une chaudière est essentiellement de transférer de l'énergie sous forme de chaleur (brûlée ou non) à de l'eau sous pression pour obtenir de l'eau surchauffée sous pression, ou de la vapeur ou un fluide à l'état supercritique qui se transforme en vapeur par détente. De plus, les grandes chaudières à vapeur sont généralement combinées avec une turbine à vapeur pour produire de l'énergie électrique.

Les chaudières peuvent être classées en fonction du type d'énergie qu'elles utilisent : les chaudières à gaz, les chaudières au fioul, les chaudières à bois, les chaudières électriques ou encore les chaudières hybrides qui combinent les deux sources d'énergie. Elle peut également s'appuyer sur différentes technologies, classiques, cryogéniques ou à condensation.

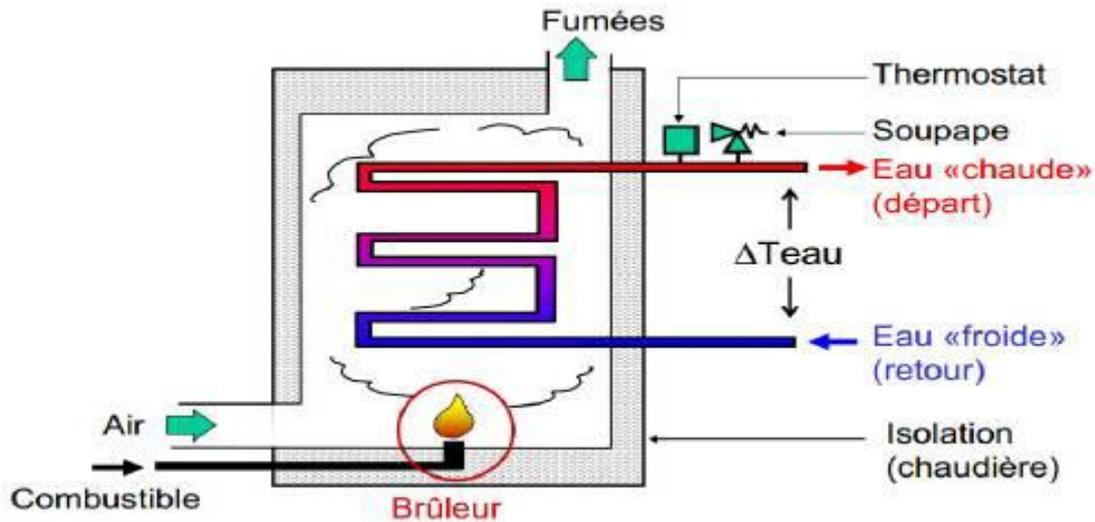


Figure I.2 : Rôle de la chaudière

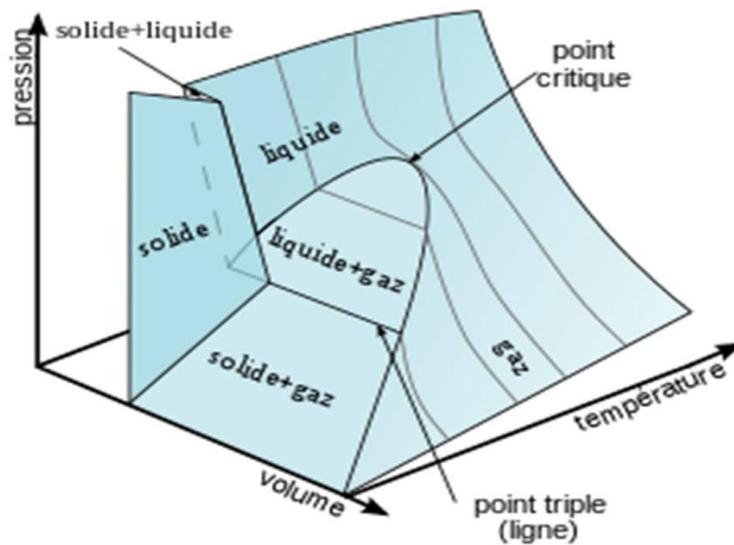
#### I.4. Aspect thermodynamique des chaudières

La base essentielle pour l'étude du transfert thermique lors de l'ébullition est la thermodynamique de changement de phase. Dans la pratique, on considère que le système est à l'équilibre thermodynamique quand la température du système est uniforme.

##### ➤ Diagramme thermodynamique

Le terme **diagramme thermodynamique** fait référence à un diagramme (Généralement en 2 ou 3 dimensions), dans laquelle en tant que les coordonnées apparaissent des quantités thermodynamiques (par exemple température, pression, volume, enthalpie, énergie libre).

L'analyse du transfert thermique en changement de phase entre liquide et vapeur dans la conception d'une chaudière ou d'un condenseur exige une compréhension du principe d'équilibre des deux phases.



**Figure I.3 :** Schéma d'état p-V-T, représentatif de tous les états thermodynamiques d'un système à un composant.

#### ➤ Diagramme entropique

Ce diagramme est utilisé principalement pour l'étude des cycles de machines à vapeur. C'est une représentation graphique de toutes les évolutions qu'un fluide peut subir. Ce diagramme est Organisé de la manière suivante :

- Sur l'axe des abscisses, on trouve l'entropie massique  $S$  exprimée en  $\text{kJ/Kg. K}$
- Sur l'axe des ordonnées, on trouve la température  $T$  exprimée en  $^{\circ}\text{C}$
- Ce diagramme est divisé en trois zones par une courbe dite courbe de saturation au sommet de laquelle se trouve un point critique qui sépare la partie du liquide saturé de celle de la vapeur saturée :
  - La partie liquide sous refroidi se trouve à gauche de la courbe d'ébullition
  - La zone à l'intérieur de la courbe de saturation correspond à la phase de Changement d'état (mélange liquide-vapeur).
  - L'espace vapeur se trouve à droite de la courbe de rosée

## I.5. Différents types de chaudières

### I.5.1. Chaudières à tubes de fumées

Les chaudières à tubes fumée sont les premières machines à vapeur utilisées dans l'industrie. [1]

La chaudière à tube de fumée est constitué d'un grand réservoir d'eau (ballon Cuve cylindrique), traversée par des tuyaux (tubes de four) et circulant dedans fumée.

Le transfert de chaleur se produit entre le tube de gaz de combustion et l'eau du réservoir principalement réalisé en mode convection. [2]

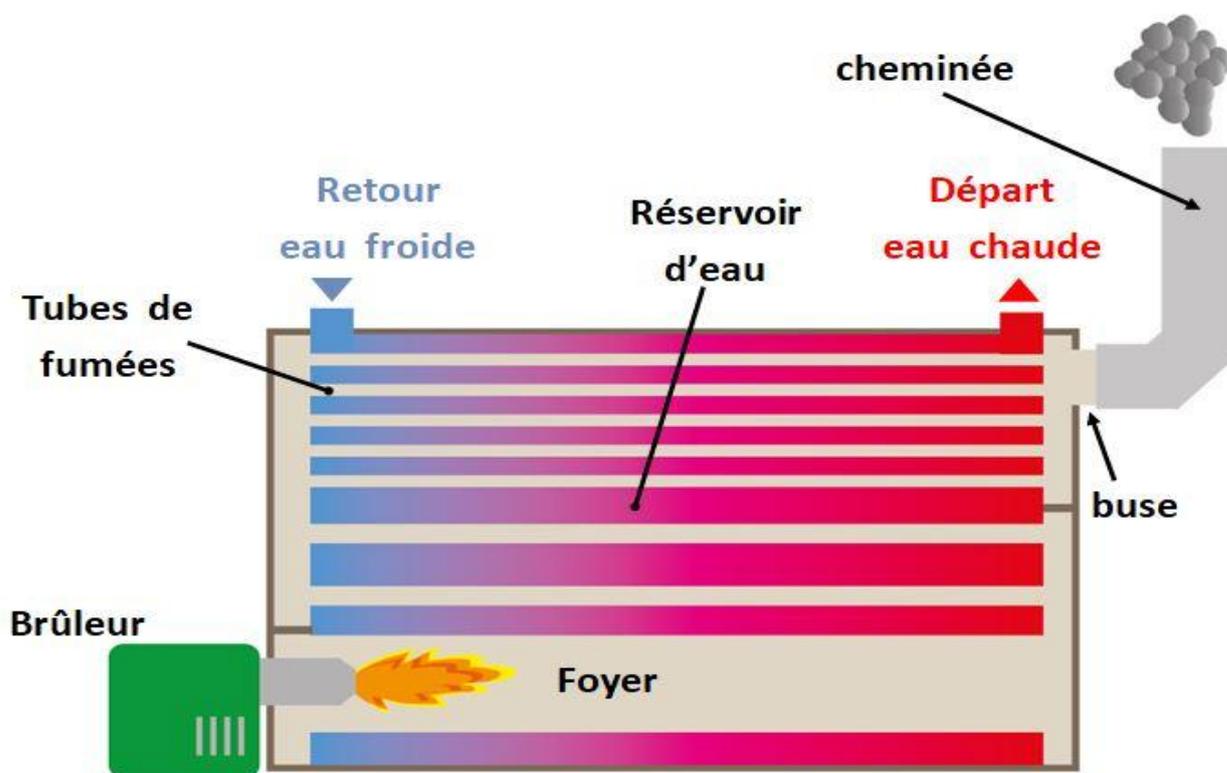


Figure I.4 : Chaudière à tube de fumée

Les générateurs de vapeur à tubes de fumée présentent plusieurs difficultés : [3]

- La principale difficulté de mise en œuvre est de concilier la forte dilatation du tube de focalisation relativement chaud, l'expansion du tube est plus modérée et l'effet de refroidissement est meilleur en raison de leur plus petit diamètre.
- La deuxième difficulté est de maintenir la pression de fonctionnement sans déformation excessive ce qui cela nécessite également l'ajout de tirants dans la zone située entre les bas avant et arrière éloignez-vous des tubes.

- La troisième difficulté est que le ramonage actif est en réalité impossible, alors que le ramonage actif devrait se faire dans la direction dans laquelle la fumée se déplace, donc une fois dans une direction, une fois dans l'autre dépend du passage de la fumée.
- La dernière difficulté est l'entartrage des tubes du four, auquel ce type est particulièrement sensible à ce type d'encrassement.

### I.5.2. Chaudières à tubes d'eau

Les chaudières à tubes d'eau ont été développées entre 1958 et 1978, Ce sont des chaudières pouvant atteindre de fortes pressions et de fortes puissances (100 bars, 100 T/h).[4]

Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur supérieur à 20 tonnes/h, en moyenne et haute pression [1]. Ils représentent la grande majorité des chaudières en service. Ils sont utilisés dans les grandes installations industrielles et les centrales électriques pour produire de la vapeur à haute pression. Ils utilisent comme combustible du gaz, de l'huile ou du combustible solide. [2]

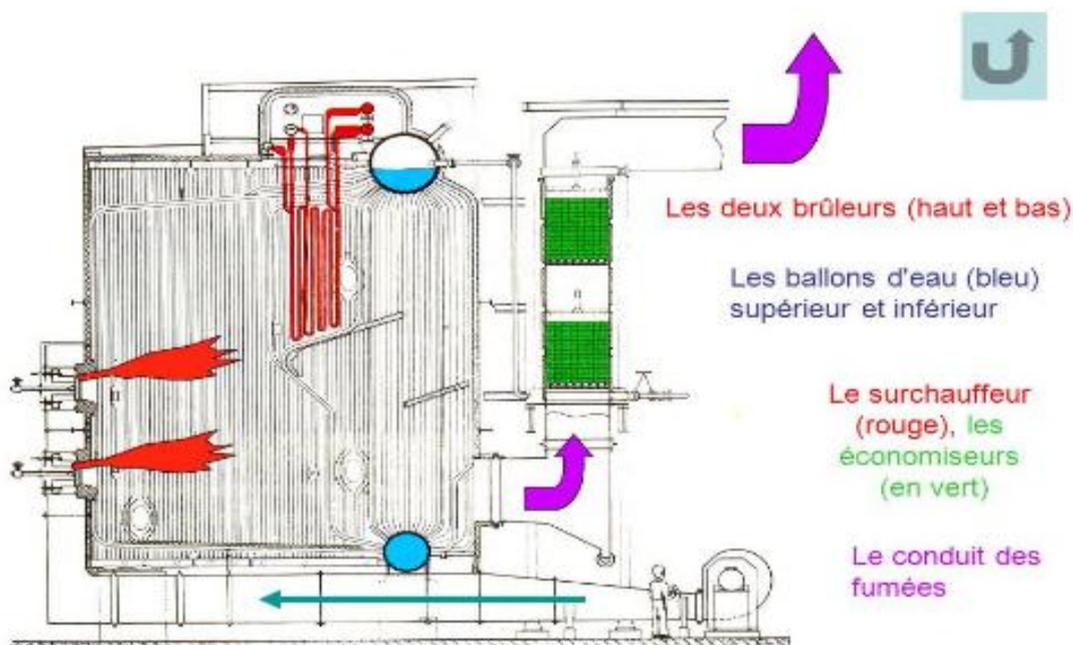


Figure I.5 : Schéma de la chaudière à tubes d'eau

#### ➤ Fonctionnement d'une chaudière à tube d'eau

Les chaudières à tubes d'eau ont généralement deux réservoirs ou plus, le réservoir supérieur appelé ballon collecteur et le réservoir inférieur appelé ballon distributeur, qui sont reliés par des faisceaux tubulaires vaporisateurs. [1] Le gaz, le fioul, le charbon ou les

déchets sont tous utilisés comme combustible. Le fluide caloporteur (eau) qui circule dans des tubes verticaux, horizontaux ou inclinés. Le combustible (gaz) circulant à l'extérieur du générateur chauffe l'eau en circulation et la transforme en vapeur.

La vapeur produite ainsi est recueillie dans le ballon supérieur et l'eau excédentaire est ramenée vers le ballon inférieur par des tubes de chute non chauffés.

Contrairement à une chaudière à tubes de fumées, où la chaleur est transférée entre les tubes et les gaz de combustion par convection, une chaudière à tubes de fumées utilise principalement la radiation pour transférer la chaleur entre les tubes et les gaz de combustion.[2]

➤ **Classification des chaudières à tubes d'eau**

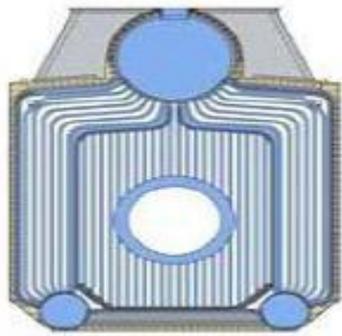
Les chaudières à tubes d'eau sont généralement classifiées suivant les caractéristiques suivantes :

- La position du réservoir supérieur
- La nature de la circulation d'eau, naturelle ou forcée
- Le nombre de ballons
- La capacité de la chaudière.

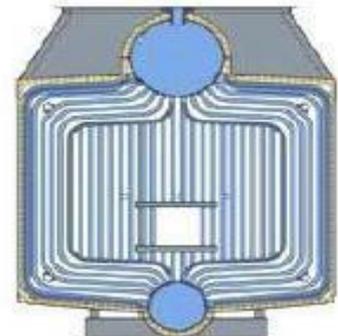
Il existe plusieurs types des générateurs de vapeur à tubes d'eau, distingués selon leur design ou leur utilisation. A titre d'exemple, on peut citer les générateurs de vapeur (Figure. I.6) :

Type-A, type-O, type-D et ainsi que les générateurs de vapeur nucléaires. Les générateurs de

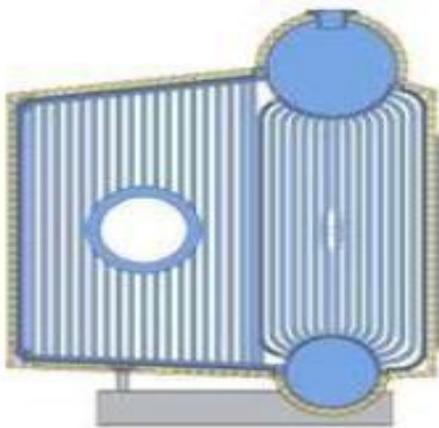
Vapeurs à tubes inclinés ou verticaux.



Chaudière type-A



Chaudière type-O



Chaudière type-D



Chaudière type nucléaire

Figure I.6 : Différents types de chaudières à tubes d'eau.

### I.5.3. Comparaison des performances des deux types de chaudières

Le choix de chaudière dépend de différents aspects et critères selon les besoins et le but (tableau I.1) ci-après montre une comparaison entre les deux principaux types de construction (les chaudières à tube fumées et les chaudières à tubes à l'eau) :

Propriétés	Chaudières à tube fumées	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

<b>Surface de chauffe</b>	Moyenne	Elevée
<b>Sécurité</b>	Médiocre	Bonne
<b>Encombrement</b>	Faible	Fort
<b>Prix</b>	Limite	Elevée
<b>Applications usuelles</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Puissance</li> <li>• Débit</li> <li>• Timbre (Pression à max d'utilisation)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moyennement élevée</li> <li>• 1,5 à 25 t/h</li> <li>• 10 à 20 bars</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Importante</li> <li>• 4 à 200 t/h</li> <li>• 90 à 100 bars (en Circulation naturelle) et jusqu'à 225 bar (circulation forcée)</li> </ul>

**Tableau I.1:** Comparaison des performances des chaudières [1]

## I.6. Circulation d'eau dans les chaudières

La circulation de l'eau ou de l'émulsion d'eau et de vapeur dans les tubes de la chaudière est destinée à assurer d'une part le refroidissement correct des tubes situés dans les zones les plus chaudes ou exposées au rayonnement direct du feu et qui reçoivent le flux maximal de chaleur, et d'autre part, d'assurer le passage du fluide chauffé de l'état eau à l'état émulsion d'eau et de vapeur.

Une bonne circulation empêche les grosses bulles de pénétrer dans le collecteur de vapeur ainsi qu'une émulsion chaotique, favorisant ainsi un phénomène spécial appelé « amorçage », où l'eau est entraînée dans la vapeur [5].

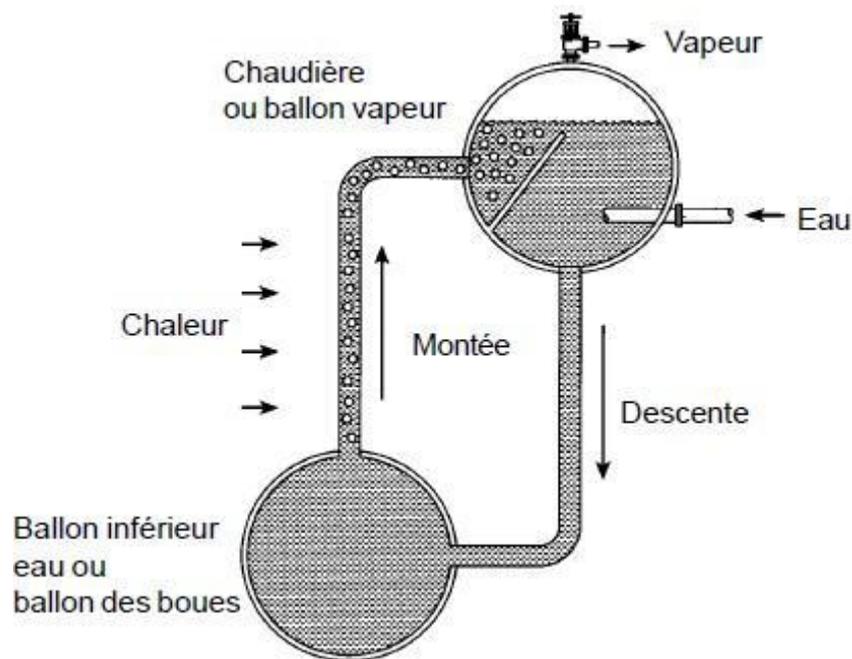
Les cycles dans les chaudières sont généralement divisés en trois catégories /

### I.6.1. Circulation naturelle

La circulation naturelle du mélange eau-vapeur est dite circulation naturelle car elle s'établit dans le circuit du générateur de vapeur et n'est pas l'effet de différences de densité dans la colonne de fluide existante [6]. Il repose sur le principe schématisé sur la figure (I.7). Il est plus actif à faible puissance et est facile à démarrer au démarrage de l'installation. Ceci explique la flexibilité et la simplicité des chaudières à circulation naturelle [6].

La circulation de l'eau dans une chaudière à tubes d'eau comporte un réservoir supérieur (appelé réservoir de chaudière) issu d'un gros tube (appelé « descendant ») placé à l'extérieur du feu. Le tube du foyer est relié à ce ballon inférieur ou à ces collecteurs. De l'eau d'appoint (eau froide) est introduite dans le réservoir collecteur car cette eau est plus dense plus chaude que l'eau chaude existante, elle tombera naturellement par ces tuyaux.

En descendant, il commence à absorber de la chaleur jusqu'à atteindre une zone de température particulièrement élevée et de densité beaucoup plus faible, auquel cas il monte et retourne vers le ballon qui l'a introduit. Ce mouvement de l'eau (on peut imaginer la trajectoire d'une seule goutte d'eau) ne s'obtient pas avec une pompe : pour cela on l'appelle : circulation naturelle [3].



**Figure I.7 :** Principe de fonctionnement des chaudières à convection naturelle circulation naturelle.

### I.6.2. La circulation forcée

La circulation forcée de l'eau dans la chaudière provoque le pompage de l'eau et sa circulation dans les tubes et les collecteurs, ce qui détermine la perte de charge totale dans les circuits de l'évaporateur et du surchauffeur et agit comme stabilisant [3].

Dans les chaudières à circulation forcée, de petits tubes sont utilisés et une perte de pression constante doit être assurée, ce qui entraîne des chutes importantes (élevées) entre

les alimentations. Le débit d'eau et de vapeur est d'environ 30 à 40 % de la pression d'entrée (250 bars) contre 20 à 25 % pour les chaudières à circulation naturelle [5].

Ce cycle présente des avantages significatifs car il entraîne une répartition plus uniforme de la température du métal et une expansion plus uniforme dans tout le générateur. Il convient à toutes les pressions sous-critiques et supercritiques et n'est pas utilisé pour des pressions inférieures à 80 bars (en raison du coût).

## **I.7. Différents composants d'une chaudière**

Une chaudière est constituée par les éléments suivants :

- Le corps chaudière ainsi de tout équipements reliés (tuyauterie, collecteur de vapeur, Etc....)
- Un bruleur qui assure la présence de la flamme pour chauffer le fluide caloporteur.
- Un réservoir d'eau d'alimentation.
- Des pompes d'alimentation pour le réservoir et le remplissage de la chaudière.
- Des vannes qui assurent la protection et le transport le fluide caloporteur et le combustible.
- Pressostat ou un détecteur de pression.
- Soupapes de protection et de vidange.
- Sondes de niveau pour réservoir et chaudière.

### **I.7.1. Description des éléments de chaudière**

#### **I.7.1.1. Réservoir (ballon)**

Est un composant essentiel du générateur de vapeur et est composé de deux ballons, le ballon supérieur et le ballon inférieur. La partie supérieure du corps cylindrique (ballon supérieur) est occupée par la vapeur, tandis que la partie inférieure (ballon inférieur) est occupée par l'eau. Le ballon, un gros cylindre horizontal à parois épaisses situé au sommet de la chaudière, remplit plusieurs fonctions, à savoir :

- La séparation de l'eau et de la vapeur contenues dans l'émulsion
- L'équilibrage des pressions eau et de vapeur grâce au maintien d'un plan d'eau
- L'introduction de l'eau d'alimentation dans le système évaporateur
- La répartition correcte de l'eau d'alimentation dans les tubes de descente, avec le minimum d'entraînement de vapeur

- L'introduction et la dilution des produits de traitement de l'eau de la chaudière
- L'extraction de déconcentration.

### **I.7.1.2. Chambre de combustion (Foyer)**

C'est une chambre cylindrique où se produit la combustion du carburant, constituée de tubes d'écrans vaporisateurs, dont le rôle principal est d'assurer la combustion dans des conditions appropriées, telles que la sécurité, le rendement et le minimum d'entretien. Il est parfois possible d'utiliser plusieurs combustibles séparément ou ensemble pour assurer une partie importante de l'échange thermique de la chaudière, et de préférence une combustion à haute température. La chaleur introduite dans la chambre de combustion après la combustion se divise en [2] :

- Chaleur transférée au fluide directement par les parois
- Chaleur évacuée par les fumées à la sortie du foyer
- Chaleur perdue vers l'extérieur par les calorifugées du foyer (souvent négligeable, de l'ordre de 0.2%).

### **I.7.1.3. Brûleur**

Le brûleur de la chaudière est essentiellement composé d'un distributeur d'air de combustion et d'un injecteur de combustible [1].

Il consiste à mélanger le combustible avec l'air et à produire de l'énergie en brûlant le mélange.

## **I.7.2. Appareils de sécurité**

La chaudière est protégée par les appareils suivants : manomètre, soupape de sureté et vannes de régulation.

### **I.7.2.1. Pompes**

Sont des dispositifs capables de transférer de l'énergie entre un fluide et un dispositif mécanique approprié. Ces machines communiquent au fluide soit principalement de l'énergie potentielle par l'augmentation de la pression en aval, soit principalement de l'énergie cinétique par la mise en mouvement des fluides pompés. Les principes les plus courants sont les suivants :

➤ **Pompe d'alimentation :**

La pression de travail d'une pompe à haute pression doit être supérieure à celle de la chaudière.

➤ **Pompe et régulateur de pression :**

La pompe qui aspire le gaz naturel a également pour fonction de maintenir une pression suffisante au gaz pour qu'il se pulvérise via un régulateur.

### **I.7.2.2. Cheminée**

La cheminée d'une chaudière permet l'évacuation de la fumée de la zone du générateur vers l'extérieur. La convection naturelle, qui résulte de la différence de densité entre l'air et la fumée chaude, permet l'évacuation de la fumée.

### **I.7.2.3. Appareils de récupérations**

Ils aident à augmenter le rendement de la chaudière en épuisant le plus possible la chaleur contenue dans les gaz brûlés avant leur rejet dans l'atmosphère.

## **I.8. Conclusion**

Ce chapitre visait à fournir une vue d'ensemble sur les chaudières, leur principales composants, ainsi que leur classification. Leur rôle important dans les différents processus énergétiques et aussi nous avons exploré les différents types de chaudières, notamment les chaudières à tube d'eau et les chaudières à tube de fumée.

Dans le cadre de ce travail notre intérêt portera sur la chaudière (industriel) à tube d'eau, utilisé dans le complexe CEVITAL et dont les différents besoins pour cela seront détaillés dans les chapitres à suivre.

## *Chapitre II*

### *Cogénération et description de la chaudière STEIN-CEVITAL-*

## **II.1. Introduction**

La vapeur produite par une chaudière est une ressource énergétique polyvalente qui joue un rôle crucial dans différents processus industriels, parmi lesquels, la cogénération. Dans ce processus, la vapeur générée par la combustion de combustibles fossiles ou de biomasse est utilisée pour entraîner une turbine produisant de l'électricité, tout en récupérant la chaleur résiduelle pour des usages thermiques. Cette double utilisation permet d'optimiser l'efficacité énergétique globale, en réduisant les pertes de chaleur et en augmentant la productivité, tout en minimisant l'impact environnemental. Les installations de cogénération sont couramment utilisées dans les industries, les bâtiments commerciaux et les réseaux de chauffage urbain, démontrant leur importance stratégique dans la transition énergétique et la gestion optimale des ressources.

## **II.2. La cogénération**

### **II.2.1. Histoire de la cogénération**

Au début du vingtième siècle, la vapeur était la principale source de la puissance mécanique. Pendant ce temps, l'électricité est devenue plus contrôlable. Ainsi, de nombreuses petites centrales qui produisaient de la vapeur avaient commencé à produire et utiliser l'électricité, elles ont adapté leurs systèmes pour produire de la vapeur et de l'électricité à la fois. La cogénération pendant cette période était absente.

Puis au début des années 70, ce moyen énergétique a été développé et l'intérêt de la cogénération a commencé à reprendre sa place. Les premières législations concernant la cogénération ont eu lieu aux États-Unis en 1978, et à la Communauté Européenne et au Royaume-Uni en 1983 les centrales de cogénération ont été développées afin d'utiliser l'énergie possible du carburant pour produire de l'électricité et de la chaleur [7].

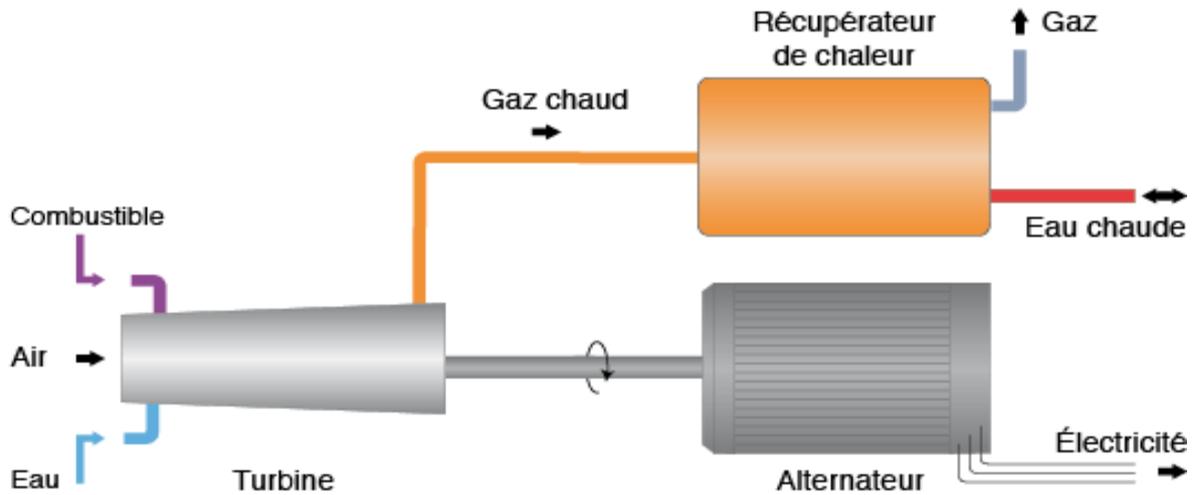


Figure II.1 : Schéma de la cogénération

## II.2.2. Principales sources utilisés dans l'installation

### ➤ Combustion

Il existe trois types de combustibles solides : le charbon, liquide : le fioul, gazeux : le gaz naturel. Chaque chaudière ne peut en utiliser qu'un seul, car chaque combustible exige un brûleur particulier, contrairement au charbon et au fioul, le gaz ne nécessite aucun traitement il est directement envoyé dans les brûleurs.

La combustion par les deux brûleurs dans le foyer est réalisée par un mélange d'air comburant et d'un combustible. Le complexe agroalimentaire utilise le gaz naturel comme source d'énergie primaire. La consommation actuelle pour la production est de l'ordre de  $54,19 \cdot 10^6 \text{ Nm}^3 / \text{an}$ .

### ➤ L'eau ultra pure

La centrale de cogénération CEVITAL utilise l'eau ultra pure ne contenant presque aucune impureté ionique, avec un très faible taux de particules et éléments chimiques, c'est une eau ne contenant presque que les molécules  $H_2O$ .

Cette eau est obtenue après un long traitement effectué sur l'eau brute (forages et ADE) pour avoir en résultat une eau ultra pure avec une conductivité qui ne dépasse pas 0.03S/m.

➤ **Intérêt d'utilisation de l'eau ultra pure**

Cette qualité d'eau est exigée afin d'assurer le fonctionnement normal des turbines et d'éviter toute phénomène d'entartrage et corrosion soit caustique, acide dans les chaudières et les conduites de canalisation (tuyauterie).

➤ **Alimentation en air des brûleurs**

L'air nécessaire à la combustion est amené dans le brûleur au moyen d'un ventilateur centrifuge. Ce ventilateur doit assurer le débit d'air nécessaire à la combustion.

Le réglage de la quantité d'air de combustion ainsi que le mesurage sont effectués en commun pour les deux brûleurs

### **II.2.3. Intérêt de la cogénération**

Le principal avantage d'une centrale de cogénération est de pouvoir bénéficier de ces dégagements de chaleur tout en étant proche de la charge thermique. Au lieu d'utiliser seulement 25 à 55% d'énergie combustible, nous bénéficierons de 60 à 90 pour cent d'énergie primaire, selon l'équipement et l'application. Les déchets thermiques peuvent être utilisés dans les processus industriels, le chauffage des locaux, la production d'eau chaude et de froid, et bien d'autres utilisations [7].

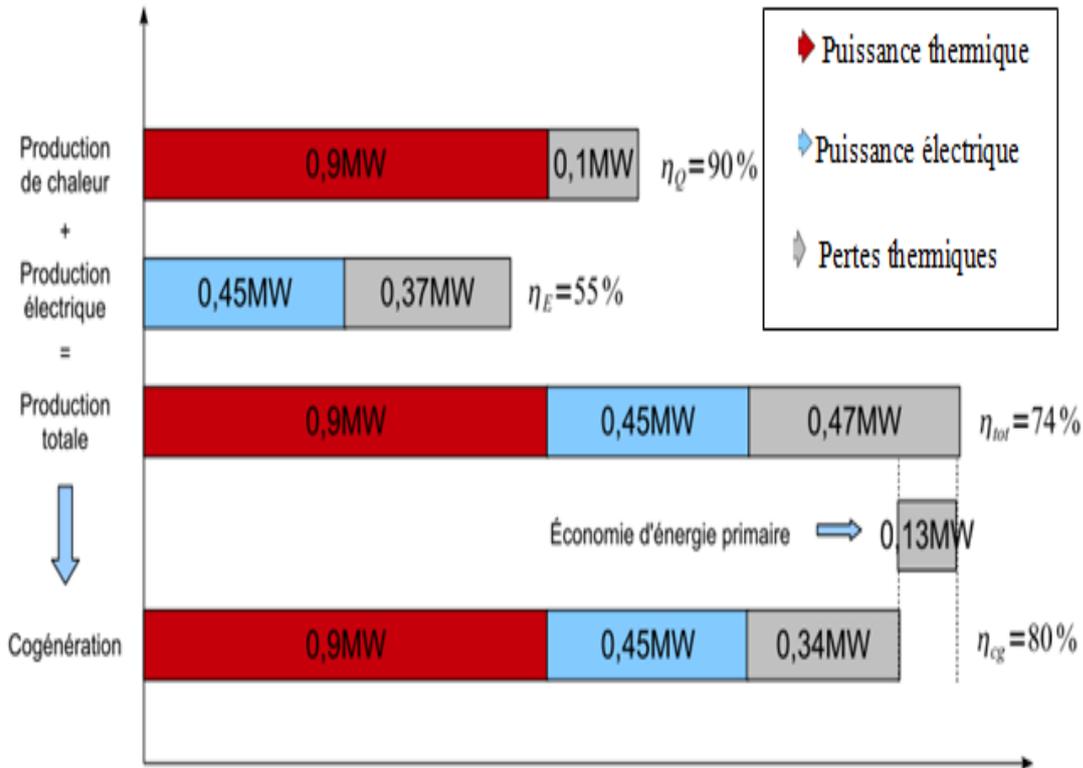
Sur le plan financier, la valeur de l'électricité produite est le facteur le plus souvent influent. La noblesse de cette forme d'énergie réside dans sa facilité de transport par rapport à la chaleur et sa capacité à satisfaire un plus grand nombre de besoins énergétiques.

Cependant, lorsqu'on met en œuvre une installation pour satisfaire un besoin thermique spécifique, il est recommandé de considérer simultanément la production d'électricité afin d'optimiser l'énergie [8].

### **II.2.4. Impact de la cogénération sur l'environnement**

Les centrales thermiques sont principalement défavorisées par l'émission de polluants chimiques et de gaz à effet de serre. Au contraire, le progrès de méthodes efficaces et de nouvelles techniques (cogénération) pour réduire ces émissions continue de permettre au secteur de l'énergie thermique de continuer à participer à la croissance économique, en particulier dans les zones où les autres sources d'énergie sont limitées.

La figure (II.2), illustre l'intérêt de la cogénération sur l'économie de l'énergie primaire, estimant une réduction de 25% de cette dernière ; entraînant une réduction des émissions à effet de serre [9].



**Figure II.2 :** Economie d'énergie primaire avec la cogénération [10].

### II.2.5. Différentes technologies de cogénération

Le terme de cogénération est générique et définit un principe qui se décline en différentes technologies. Parmi elles, on peut citer :

- Moteur à piston ;
- Turbine à vapeur ;
- Turbine à gaz ;
- Pile à combustible.

Chaque installation de cogénération est caractérisée par son type de combustible, un rendement de travail, la quantité et la température de la chaleur récupérable. Une caractéristique importante d'une installation de cogénération est connue sous le nom chaleur/force pour un certain point de fonctionnement choisi ; ce terme désigne le rapport entre la puissance contenue dans la chaleur et la puissance électrique [11].

### **II.2.6. Description de la centrale cogénération CEVITAL**

L'installation de cogénération CEVITAL est destinée à produire l'énergie thermique et l'énergie électrique par l'exploitation d'un système qui transforme une source primaire d'énergie à la fois en travail (ou électricité) et en chaleur (vapeur).

Pour une production combinée de chaleur au sein du complexe CEVITAL différents équipements sont nécessaires pour la centrale de cogénération comme détaillé ci-dessous :

- Une Bâche alimentaire
- Trois pompes alimentaires
- Deux Chaudières
- Deux groupes turboalternateurs
- Six évapo-condenseurs
- Deux échangeurs à plaque

Le principal objectif de la centrale étudiée est de fournir de la chaleur aux divers processus des unités du complexe (deux raffineries de sucre à 1600 tonnes par jour, 3000 tonnes par jour et la raffinerie d'huile).

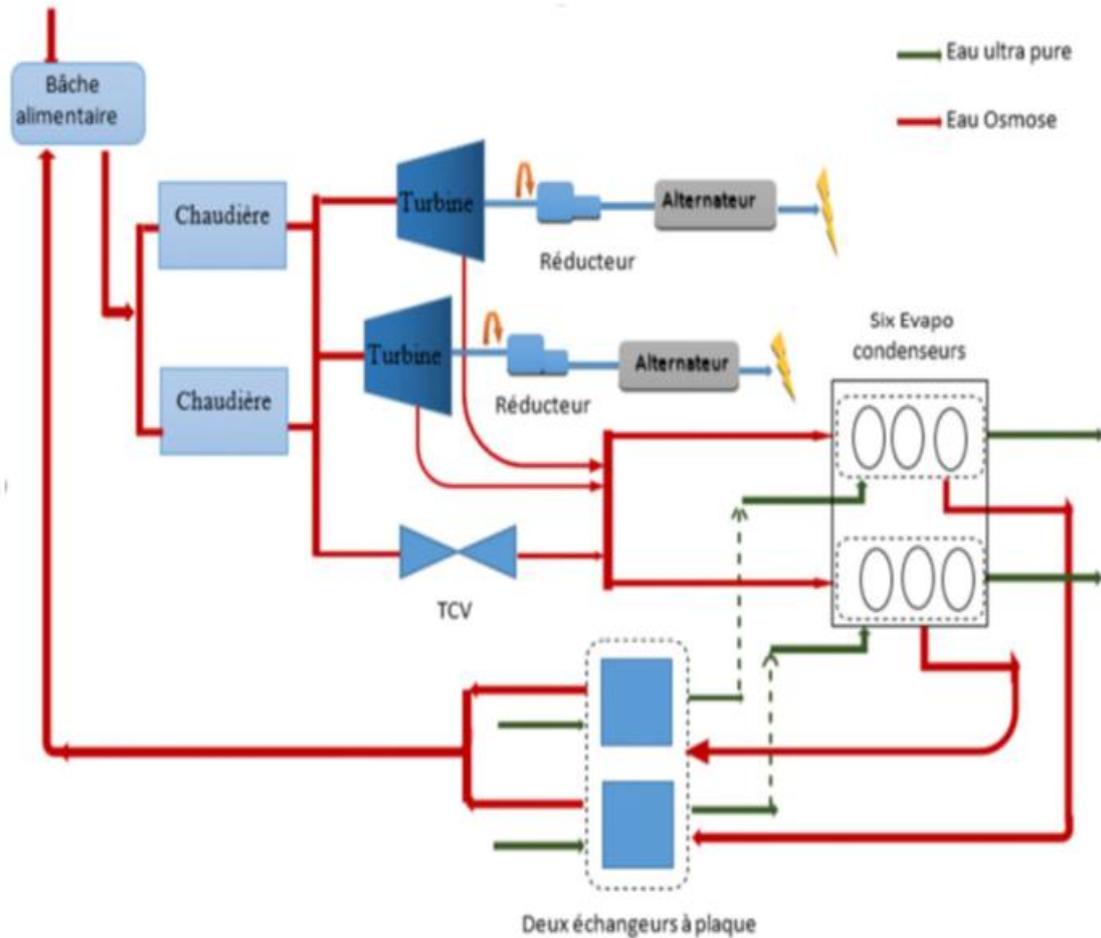


Figure II.3 : Schéma représentant le procès de la cogénération à Cevital

### II.2.6.1. Bâche alimentaire

La bâche alimentaire est un réservoir d'eau de forme cylindrique en position horizontale qui sert essentiellement à alimenter les deux chaudières en eau ultra pure, et équilibrer le débit d'eau d'alimentation de la chaudière entre les retours des condensats et l'eau d'appoint traitée.

Elle est d'une capacité de  $88m^3$ , dimensionnée pour 95% de retour de condensat et de 5% d'eau d'appoint.

La régulation du niveau et de pression de la bâche permet de maintenir la température de l'eau alimentaire à une température proche de  $105C^{\circ}$ . Cette régulation est basée sur la mesure de pression dans la bâche et agit sur la vanne de régulation d'injection de vapeur.

La bâche se trouve à 6m de hauteur du sol, pour éviter la cavitation des pompes alimentaire (création de bulles de vapeur qui vont étouffer les pompes). (Figure II.4)

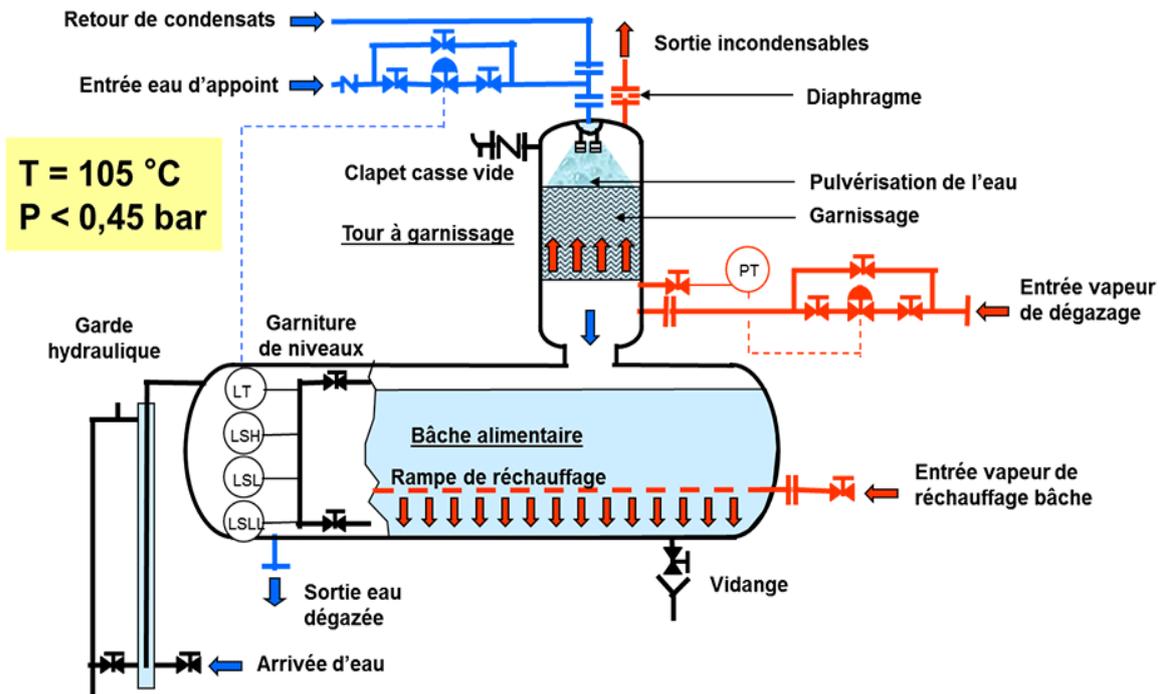


Figure II.4 : représentation schématique de la bûche alimentaire.

### II.2.6.2. Pompes alimentaires

On dispose de trois groupes motopompes P01, P02 et P03 type centrifuge multicellulaire, dont deux fonctionnent simultanément et une de secours. Leur fonction est d'assurer un débit souhaité mais dans des conditions de pression imposées.

Chaque pompe aspire l'eau alimentaire à une pression de 1,2 bar à 105°C et le refoule à un débit de 150 T/h à une pression de 66 bars (figureII.5). Le débit de dimensionnement est 181T/h et le débit minimal de 40T/h pour chacune.

### II.2.6.3. La chaudière étudiée

#### A. Description

Une chaudière peut être définie comme un système dans lequel l'énergie d'un combustible (entrée) est cédée et transférée à un liquide pris, dans le cas des chaudières à vapeur, l'énergie produite permet de changer l'état d'une phase liquide à une phase gazeuse.

Pour notre système il s'agit de deux chaudières à vapeur Stein de type tubes d'eau à simple ballon et à circulation naturelle, chacune d'entre elle produit 150T/h de vapeur surchauffée à une pression de 54 bars et une température de 480 C°.

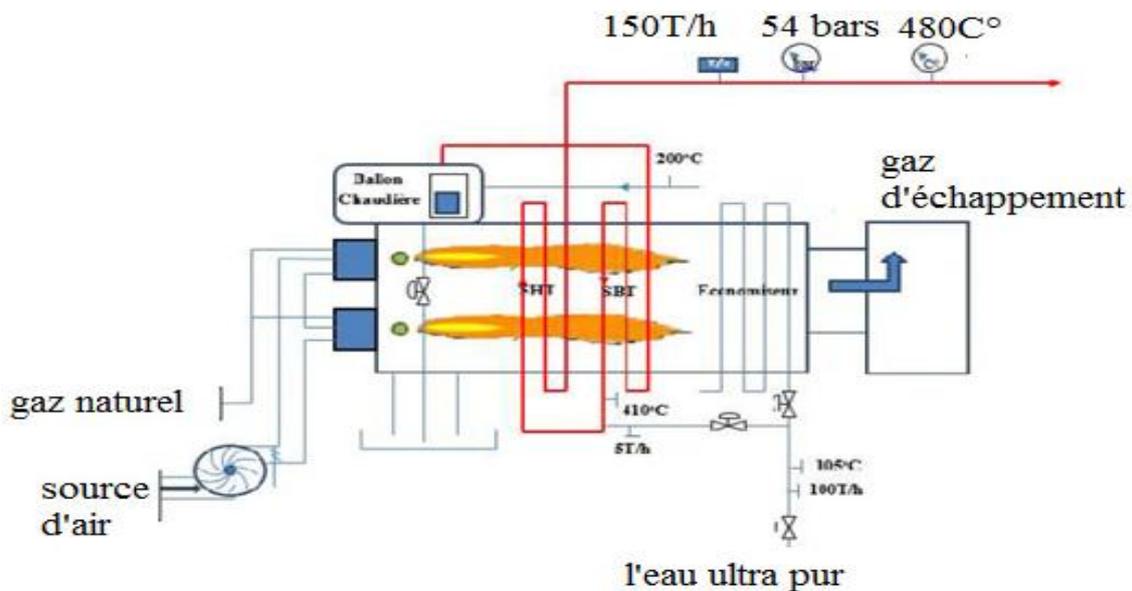
Chaque chaudière est équipée de deux brûleurs à gaz naturel, quatre blocs d'échangeurs thermiques avec le circuit vapeur. Le premier est un surchauffeur haute température (SHT), le deuxième est un surchauffeur basse température (SBT). Le bloc de surchauffe est séparé par une désurchauffe placée entre les deux surchauffeurs pour contrôler la température de la vapeur à la sortie de la chaudière, et les deux autres blocs qui restent sont l'évaporateur et l'économiseur [12-13].

### **B. Caractéristiques**

- **Production vapeur surchauffée :**
  - Débit nominal 150 T/h.
  - Pression de service 53 Bar.
  - Température vapeur surchauffée 480 C°.
- **Combustibles :**
  - Gaz naturel.

### **C. Principe de Fonctionnement**

Le premier élément traversé par l'eau alimentaire refoulé dans la chaudière à travers les pompes alimentaires est l'économiseur. C'est là où l'eau va être chauffée par la fumée de combustion, pour qu'elle se dirige vers le ballon chaudière, la vapeur qui sort de ce dernier rentre dans le surchauffeur SBT qui injecte de l'eau venant de la bache alimentaire pour baisser la température, enfin elle termine sa course dans la surchauffeur SHT.



**Figure II.5 : schéma fonctionnel de la chaudière**

#### **D. Éléments constitutifs de la chaudière**

##### **➤ Economiseur**

C'est une tuyauterie en forme de serpent, qui reçoit de l'eau venant de la bache avec une température de 105C°, il a pour rôle de récupérer au maximum les calories des gaz de combustion après leur sortie de la chaudière.

##### **➤ Vaporisateurs**

Le rôle du vaporisateur est de vaporiser l'eau qui venait de ballon puis la renvoyer de nouveau vers ce dernier.

##### **➤ Surchauffeur**

Situé sur le parcours des fumées entre la sortie du foyer et le ballon. Il se divise en deux étages, un étage à basse température SBT qui sert à surchauffer la vapeur saturée sortante de l'économiseur. Il permet d'élever la température sans modifier la pression, un étage à haute température SHT récupère la vapeur sortante du SBT pour l'apporter à la température de service correspondante à la vapeur finale 480 C°. Il permet d'obtenir une vapeur 100% sèche.

##### **➤ Désurchauffeur**

C'est une vanne désurchauffe qui injecte l'eau entre les deux étages de la surchauffeur (SHT, SBT) pour la régulation de la température de vapeur.

##### **➤ Ballon chaudière**

C'est un collecteur d'eau arrivant de l'économiseur qui est destiné à la séparation de l'eau et la vapeur pour qu'elles soient distribués comme suit ; l'eau vers l'évaporateur et la vapeur saturée vers le SBT. Il est construit en acier soudé, disposé longitudinalement avec un volume total de 23,665 m<sup>3</sup> et une surface de plan d'eau de 21,5m<sup>2</sup>.

#### **II.2.6.4. Le circuit d'approvisionnement de gaz naturel**

##### **A. Sur la conduite commune aux 02 brûleurs**

- Robinet à boisseau sphérique arrêt principal de gaz naturel
- Mesurage de la quantité de gaz naturel avec transmetteur de pression différentielle correspondant
- Arrêts aux interrupteurs à pression, transmetteurs et manomètre

- Transmetteur de pression de gaz naturel
- Interrupteur à pression de gaz naturel min
- Interrupteur à pression de démarrage de gaz naturel
- Régulateur de pression air de commande pour soupape de réglage de gaz
- Soupape de réglage de gaz naturel avec positionneur annexé et rétro-signal de position
- Robinet à boisseau sphérique avant soupape de réglage de démarrage
- soupape de réglage de démarrage
- Robinet à boisseau sphérique après soupape de réglage de démarrage
- Soupape de décharge de pression avec électrovanne annexée et interrupteurs de fin de course
- Soupape de réglage manuelle après décharge de pression

### **B. Sur la conduite de chaque brûleur**

Les équipements sont identiques pour les brûleurs 1 et 2

- Collecteur d'impuretés
- Robinet à boisseau sphérique ventilation collecteur d'impureté
- Robinet à boisseau sphérique à l'entrée de la station
- Arrêt aux manomètres et interrupteur à pression
- Soupape pneumatique. 2 avec électrovanne annexée et interrupteurs de fin de course
- Soupape pneumatique. 2 avec électrovanne annexée et interrupteurs de fin de course
- Soupape pneumatique. ventilation intermédiaire avec interrupteurs de fin de course annexés

### **II.2.6.5. La chaîne de régulation**

#### **A. Le rôle de la régulation**

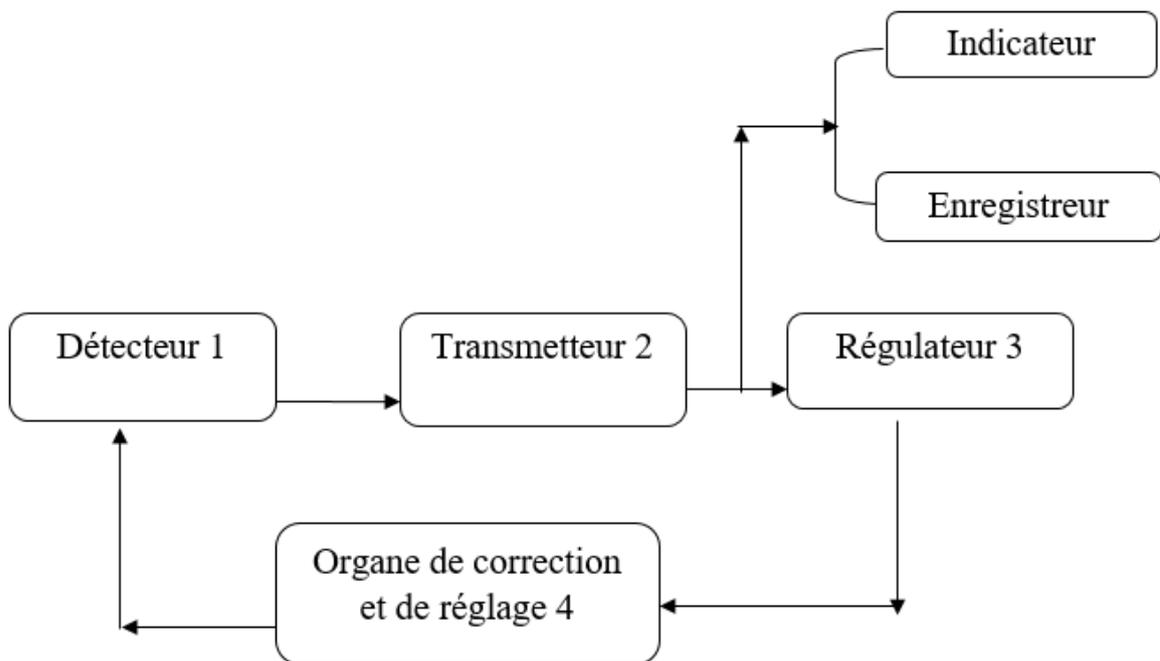
L'objectif de la régulation dans l'industrie est d'amener une grandeur physique à prendre une valeur préétablie et à la maintenir. Dans un circuit de contrôle, il est nécessaire que l'ensemble de régulation et le système réglé forment une boucle sécurisée.

Cet ensemble comprend les éléments suivant :

- **Un organe de détection** (1) qui fournit une variable physique liée à la quantité à contrôler.
- **Un organe de mesure et de transmission** (2) qui donne à chaque instant la valeur de la variable physique de l'organe de détection.

Cette variable est généralement amplifiée par un transmetteur avant d'être envoyée au régulateur.

- **Un régulateur (3)** comprenant :
  - Un outil de comparaison qui affiche l'écart entre la valeur mesurée et la valeur souhaitée (valeur de consigne) pour laquelle l'asservissement a été résolu. La déviation entre l'index du contrôle et l'aiguille de mesure de l'instrument est responsable de cette erreur.
  - Un régulateur en soi est constitué d'un dispositif amplificateur de l'erreur, fonctionnant avec une énergie externe et d'un organe de contrôle qui ajuste la quantité à contrôler afin de la faire tendre vers la valeur souhaitée (instruction). Le régulateur a pour fonction de réguler un mode d'énergie (comme la pression d'air comprimé dans les régulateurs pneumatiques) afin d'agir sur un dispositif correcteur (4) afin de ramener la variable physique à la valeur souhaitée.
- **Un organe de correction et de réglage (4)**
  - Exemple une « vanne » de régulation



**Figure II.6 :** Chaîne de régulation automatique [12].

## **B. La chaîne de régulation des chaudières**

### **➤ Régulation de charge**

L'objectif de la régulation de charge est de maintenir une pression constante en sortie de la chaudière.

#### **Principe :**

Le maintien d'une pression vapeur stable en sortie de chaudière est un critère d'équilibre entre la production et la consommation de vapeur.

L'écart entre la pression et la valeur de consigne se manifeste par une rupture de l'équilibre, que ce soit en plus ou en moins. C'est précisément cette pression qui est la grandeur la plus appropriée à ajuster pour réguler la charge.

La vanne de régulation gaz et les registres d'air comburant seront équipés d'une régulation et d'une combustion régulées par des positionneurs numériques. La régulation de l'oxygène (par l'intermédiaire de l'analyseur de fumée) a pour effet de corriger la régulation de charge.

### **➤ Régulation niveau chaudière**

En fonctionnement normal, la régulation de niveau est de type « 3 éléments », elle tient compte des trois éléments :

- Le niveau d'eau dans le réservoir (ballon).
- Le débit d'eau alimentaire.
- Le débit vapeur.

Le débit de vapeur est utilisé comme référence pour le débit d'eau, impliquant l'entrée d'autant d'eau dans la chaudière que la production de vapeur. Dans cette situation, on utilise la mesure de niveau afin de corriger la consigne de débit d'eau. L'organe de réglage est la vanne de régulation d'eau. Si la mesure de débit vapeur ou débit d'eau ne fonctionne pas, on passe à une régulation de niveau, un élément qui ne prend en compte que la mesure de niveau.

Il sera nécessaire de mettre en marche automatiquement la vanne de régulation d'eau uniquement lorsque la pression vapeur sera proche de son point de consigne (45 bar).

➤ **Régulation de mise à l’atmosphère**

En cas de pression élevée de la chaudière la régulation de décharge est employée afin d'évacuer l'excédent de vapeur et de garantir le balayage du surchauffeur pendant les phases de démarrage. Il est important de maintenir la vanne de régulation de décharge vapeur ouverte à un niveau technique minimum, car elle est étanche grâce à la vanne automatique située. Lorsque le débit de vapeur est élevé, la vanne automatique est ouverte et la vanne de régulation de décharge vapeur se positionne à sa valeur de consigne.

➤ **Régulation de la température désurchauffe**

Grâce à la régulation de température de désurchauffe, il est possible de maintenir la température de vapeur en sortie du surchauffeur à une valeur proche de celle indiquée. Il est possible de maintenir cette température en mélangeant la vapeur en sortie du surchauffeur avec de l'eau alimentaire à travers la vanne d'injection d'eau de désurchauffe.

Cet asservissement se caractérise par deux boucles de régulation : une première qui s'appuie sur la température de vapeur surchauffée en limite de fourniture une seconde qui vise à réguler le débit d'eau de désurchauffe en fonction de la charge de la chaudière.

➤ **Régulation d’oxygène**

La correction de la régulation de charge se fait par la régulation d’oxygène qui comprend :

- La mesure du taux d’oxygène dans les fumées.
- La comparaison entre la courbe d’excès d’air et la mesure d’oxygène dans la fumée

Dans la régulation de charge, la régulation d'oxygène joue un rôle de correction.

En utilisant un brûleur en mode dégradé, la régulation de l'oxygène est perturbée.

➤ **Régulation du niveau de la bêche**

La régulation de niveau bêche est du type «1élément », elle prend en compte :

- Le niveau d’eau dans le réservoir.
- La vanne de régulation d’eau est l’organe de réglage.

➤ **Régulation conductivité ballon chaudière**

La conductivité de la chaudière est influencée par la conductivité du ballon. On effectue la mesure en utilisant une sonde de conductivité connectée à un transmetteur de conductivité qui, si elle dépasse un seuil spécifique, agit directement sur la vanne de purge.

➤ **Régulation de la pression de la bache**

Grâce à la régulation de la pression bache, il est possible de maintenir la température de l'eau alimentaire à environ 105°C. La mesure de pression dans la bache est utilisée pour réguler cette régulation, qui a un impact sur la vanne de régulation d'injection de vapeur. Pendant les étapes de démarrage, il sera nécessaire de réguler manuellement les boucles de régulation de la bache jusqu'à ce que la chaudière soit connectée au réseau de vapeur client avec un débit de vapeur adéquat.

Durant toute la phase d'allumage + régulation, il est essentiel de ne pas avoir de sécurité qui déclenche, les sécurités étant mises en avant tout au long du fonctionnement du brûleur.

➤ **Les sécurités**

Il est impossible de mettre en marche la chaudière et de l'utiliser si les principales sécurités nécessaires ne sont pas réactivées.

En cas d'apparition d'une de ces sécurités pendant le fonctionnement, la chaudière serait arrêtée et verrouillée. Il serait nécessaire de procéder à l'acquisition du défaut et de réinitialiser la chaîne de sécurité pour la remise en service.

Une chaudière, un brûleur ou un arrêt d'urgence sont responsables de :

- La fermeture des vannes combustibles
- L'arrêt du transformateur d'allumage
- L'arrêt du ventilateur d'air comburant
- Arrêt de l'ensemble des moteurs
- Mise en position de repli des organes de régulation gaz et air
- Le reste des séquences

### **II.3. Conclusion**

Ce chapitre est consacré sur la présentation de la cogénération et la chaudière utilisée dans l'industrie étudiée. Nous avons analysé les avantages de la cogénération en matière d'efficacité énergétique et examiné le fonctionnement et les caractéristiques de la chaudière, soulignant son rôle dans l'optimisation des processus industriels.

Le prochain chapitre abordera l'étude de la combustion et le bilan énergétique de la chaudière, afin d'évaluer son rendement et ses performances énergétique.

## *Chapitre III*

# *Etude de la combustion et bilan énergétique de la chaudière*

### **III.1. Introduction**

Le bilan énergétique d'une chaudière est une étape essentielle pour garantir une efficacité optimale et une performance fiable du système. Il consiste notamment à déterminer la capacité nécessaire de la chaudière pour répondre adéquatement aux besoins industriels. Cela inclut également la considération des conditions climatiques locales et des variations de la demande en vapeur. Le bilan énergétique évalue la performance de la chaudière en analysant l'énergie entrée sous forme de combustible et l'énergie utile produite sous forme de vapeur. Ce processus permet d'identifier les inefficacités, d'optimiser les opérations et de maximiser le rendement, tout en minimisant les pertes d'énergie. Un dimensionnement précis est indispensable pour assurer une utilisation économique et durable, permettant ainsi une production efficace de vapeur et d'électricité, tout en répondant aux exigences environnementales et réglementaires.

### **III.2. Combustion**

#### **III.2.1. Généralité sur la combustion**

La combustion est une réaction chimique qui se produit lorsque l'oxygène se combine avec des matières combustibles. La réaction produit intrinsèquement une libération massive chaude, les composants de la combustion sont les suivant :

- Le combustible : le corps qui brule
- Le comburant : le corps qui sert à la combustion
- Le produit de combustion : les corps qui apparait au cours d'une transformation chimique

L'air est l'élément qui définit les types de combustion car on trouve trois types :

- Combustion stœchiométrique ou théorique si le débit d'air utilisé est strictement suffisant à la combustion ce qui empêche la formation de monoxyde de carbone (CO) et la présence de l'oxygène dans les fumées.
- Combustion incomplète ou en défaut d'air si le débit d'air admis pour la combustion de l'unité de combustible est inférieur au débit d'air stœchiométrique l'oxygène est totalement utilisé donc on le trouve pas dans les fumées il y a formation de monoxyde de carbone (CO).
- Combustion oxydante ou en excès d'air si le débit d'air admis à la combustion de l'unité de combustible est supérieur au débit d'air stœchiométrique donc on trouve de l'oxygène mais pas de monoxyde de carbone dans les fumée.

### **III.2.2. Pouvoir Calorifique**

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

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

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

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

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

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

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

### **III.3. Paramètres de la combustion**

➤ **Teneur en CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> :**

On peut définir la combustion en fonction de l'excès d'air (x), de la quantité d'oxygène ou de la quantité de CO<sub>2</sub> présente dans les fumées. En utilisant le taux de CO<sub>2</sub> maximal, spécifique à chaque carburant, ainsi que la mesure de l'oxygène utilisé, la concentration volumique en dioxyde de carbone peut être calculée par la formule suivante :

$$\text{CO}_2\% = \text{CO}_2\text{max}\% \cdot [1 - (\text{O}_2\%/21)]$$

Les gaz de combustion peuvent contenir une concentration maximale de CO<sub>2</sub> de 15,2 % pour le fioul et de 11,9 % pour le gaz naturel. Il est pratiquement impossible de régler le brûleur à ces valeurs sans que des imbrûlés (suie, CO) ne se produisent.

Généralement les valeurs cibles sont de :

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

➤ **Excès d'air :**

Il s'agit de la quantité d'air supérieure à la stœchiométrie requise pour la combustion complète du carburant. En général, cette surabondance d'air varie de 2 à 10% sur les équipements de chauffe industriels. Un excès d'air trop faible peut entraîner une combustion partielle, des fumées noires et un étouffement du four. Un excès d'air trop important entraîne principalement une diminution de la performance. Le calcul du lambda est basé sur la compréhension du  $CO_2$  maximal du carburant choisi et du  $CO_2$  calculé , en utilisant la formule suivante :

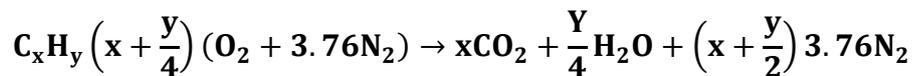
$$\lambda = CO_2\text{max}\% / CO_2\% = 21 / (21 - O_2\%)$$

### **III.4. Equation générale de la combustion**

#### **III.4.1. Réaction de la combustion**

La combustion est une combinaison de réactions chimiques qui produit de la chaleur. Lorsqu'on effectue la combustion d'un combustible, les substances contenant le combustible sont réagissant avec le dioxygène ( $CO_2$ ).

En règle générale, la combustion totale d'un hydrocarboné génère du  $CO_2$  et de l'eau ( $H_2O$ ).



En revanche, la combustion partielle d'un hydrocarbure peut produire un mélange de monoxyde de carbone (CO (dangereux), de dioxyde de carbone, d'eau, de carbone, de dihydrogène, etc.).

Avec :

$C_xH_y$  : Composant du gaz naturel.

$O_2$  : Oxygène.

$N_2$  : Azote.

$CO_2$  : Dioxyde de carbone.

$H_2O$  : Eau.

Mais cette réaction n'est qu'une évaluation globale de la combustion. À partir du combustible initial, des espèces intermédiaires de réaction se forment et participent à la production de ces produits ( $CO_2$  et  $H_2O$ ) ainsi qu'à la formation de composés plus lourds lors d'une combustion incomplète.

### **III.5. Équation stœchiométrique de la combustion du gaz naturel**

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

$$M_{O_2stoc} = 2x_{CH_4} + 3,5x_{C_2H_6} + 5x_{C_3H_8} + 6,5x_{C_4H_{10}} + 8x_{C_5H_{12}} \quad (III.1)$$

$$M_{O_2stoc} = 2 \times 0,891 + 3,5 \times 0,062 + 5 \times 0,006 + 6,5 \times 0,0017 + 8 \times 0,0003$$

$$M_{O_2stoc} = 2,04245 \text{ kmol d'air. kmol}^{-1} \text{ de combustible}$$

#### **III.5.1. Quantité d'air effective**

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

$$m_1 = X \cdot \frac{M_{O_2stoc}}{0,21} \quad (III.2)$$

$$m_1 = 1,42 \times \frac{2,04245}{0,21}$$

$$m_1 = 13,8105 \text{ kmol d'air. kmol}^{-1} \text{ de combustible}$$

Masse molaire de l'air :

$$m_A = 0,79m_{N_2} + 0,21m_{O_2} \quad (III.3)$$

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

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

Débit masse de l'air est :

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

$$\dot{m}_A = 13,8105 \times 28,84 \times 0.28195$$

$$\dot{m}_A = 112.2992 \text{ kg d'air. } s^{-1}$$

### **III.6. Combustible utilisé**

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

**III.6.1. Composition volumique du gaz naturel**

Constituant	Formule chimique	Composition volumique en %
Méthane	CH4	89,1
Ethane	C2H6	6,2
Propane	C3H8	0,6
Butane	C4H10	0,17
Pentane	C5H12	0,03
Azote	N2	3,9

**Tableau III.1:** Composition volumique en % du gaz naturel [14].

**III.6.2. Composition massique du gaz naturel**

Le passage de la composition volumique à la composition massique peut se faire à l'aide de la formule suivante : [15]

$$\mu_i = \frac{x_i M_i}{\sum x_i M_i} \quad \text{(III.5)}$$

Formule chimique	xi (%)	Mi (g.mol-1)	xi Mi	Composition massique en %
CH4	89,1	16	14,256	81,0359
C2H6	6,2	30	1,86	10,5728
C3H8	0,6	44	0,264	1,5006
C4H10	0,17	58	0,0986	0,5604
C5H12	0,03	72	0,0216	0,1227
N2	3,9	28	1,092	6,2072

**Tableau III.2:** Composition massique en % du gaz naturel [14].

La masse molaire du combustible est :

$$m_{comb} = \sum x_i M_i \quad \text{(III.6)}$$

$$m_{comb} = x_{CH_4} M_{CH_4} + x_{C_2H_6} M_{C_2H_6} + x_{C_3H_8} M_{C_3H_8} + x_{C_4H_{10}} M_{C_4H_{10}} + x_{C_5H_{12}} M_{C_5H_{12}} + x_{N_2} M_{N_2}$$

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

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

### III.6.3. Débit masse du combustible

Le débit quantité molaire de combustible est défini : [14]

$$N_{comb} = \frac{V_{comb}}{\dot{v}_{comb}} = \frac{V_{comb} P_{comb}}{RT_{comb}} \quad \text{(III.7)}$$

$\dot{v}_{comb}$  : Volume du combustible [ $m^3$ ].

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

$$R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}K^{-1} = 8314 \text{ J.mol}^{-1}K^{-1}.$$

Les données exploitées dans le tableau (II.3), sont prises dans les fiches techniques du constructeur tel que : la pression, la température, le volume de combustible, et le (PCI) : [12]

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 III.3:** Caractéristique du combustible (gaz naturel)

$$N_{comb} = \frac{1.75 \times 3,9 \times 10^5}{8314 \times 291,15} = 0.28195 \text{ Kmol. s}^{-1}$$

Le débit-masse du combustible :

$$M_{comb} = N_{comb} \times m_{comb} = 0,28195 \times 17,5922 \quad \text{(III.8)}$$

$$M_{comb} = 4.96012 \text{ kg. s}^{-1}$$

**Débit-masse de gaz de combustion :**

Débit-masse de gaz de combustion est donné par le bilan de masse :

$$\dot{m}_G = M_{comb} + \dot{m}_A \quad \text{(III.9)}$$

$$\dot{m}_G = 4.96012 + 112.2992$$

$$\dot{m}_G = 117.2593 \text{ kg de gaz. S}^{-1}$$

### **III.7. Rendement de combustion**

Le rendement de combustion est exprimé par les pertes. Pour retrouver le rendement, il suffit d'appliquer la formule ci-dessous :

$$\eta_{com} = \frac{P_i - P_{fum}}{P_i} \quad \text{(III.10)}$$

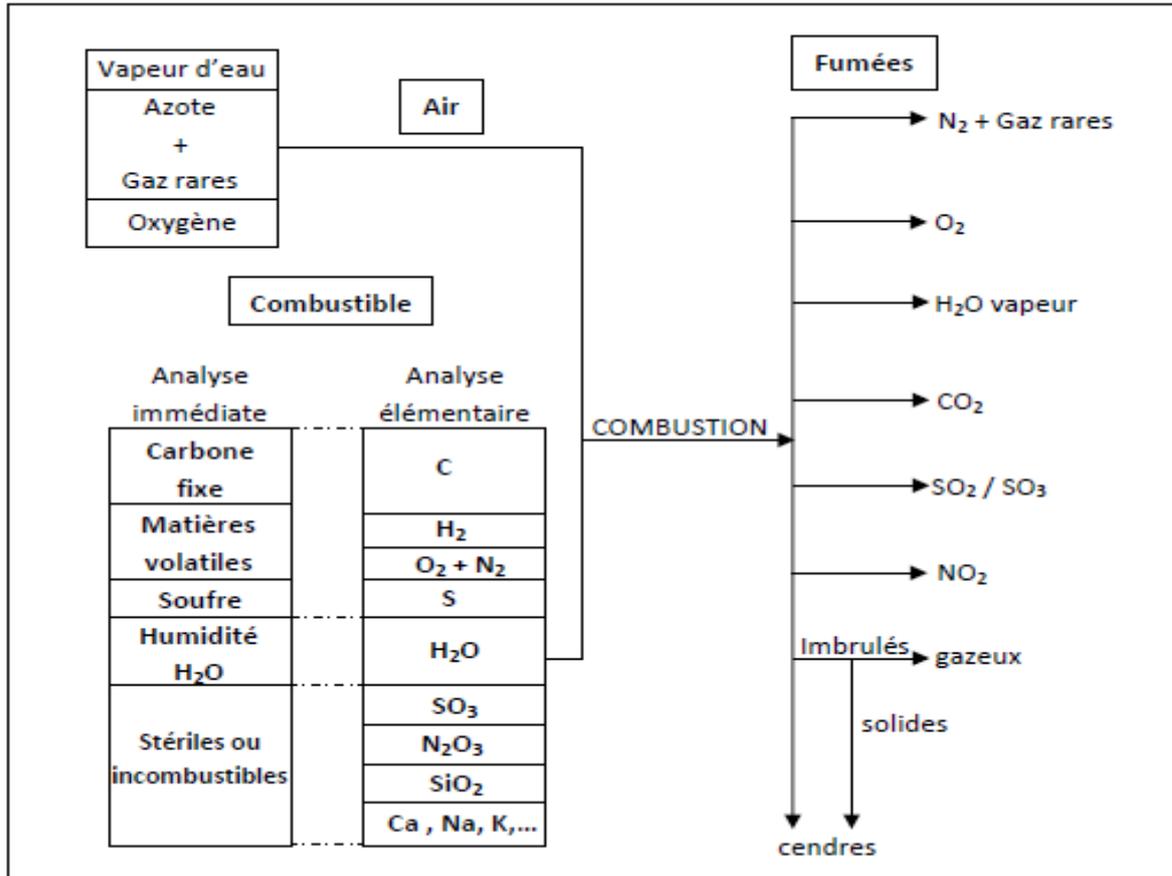


Figure III.1 : Diagramme de la combustion.

### III.8. Bilan énergétique de la chaudière

Les bilans énergétiques constituent toujours la première étape dans la conception d'une centrale thermique ou d'une chaudière. Ils permettent de relier la puissance électrique et la puissance thermique, ainsi que de déterminer les débits de combustible, d'air, de fumée et de vapeur.

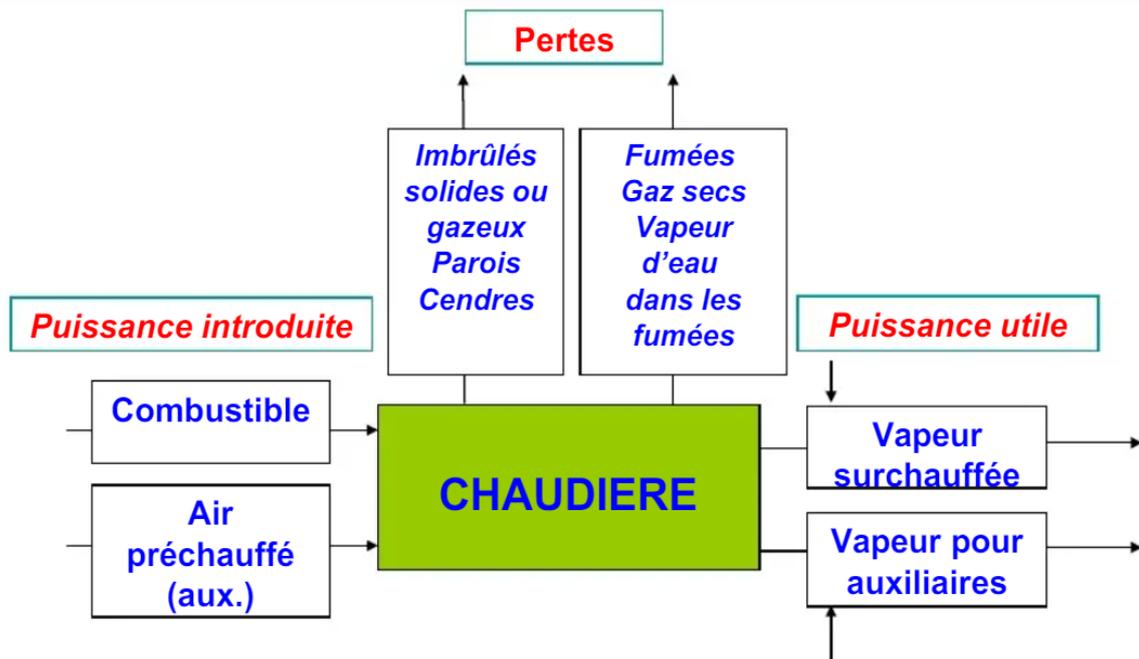


Figure III.2 : Bilan énergétique de la chaudière

➤ Les bilans énergétiques :

- Calcul de la puissance utile,
- Estimation du rendement attendu,
- Calcul de la puissance à introduire dans la chaudière sous forme de combustible,
- Calcul du débit massique (ou volumique) de combustible ;

**Bilan matière**

- Estimation de l'excès d'air nécessaire à l'obtention d'une combustion correcte (fonction de la nature du combustible),
- Calcul du débit d'air nécessaire à la combustion,
- Calcul du débit (massique et volumique) des fumées engendrées par la combustion, et éventuellement de la quantité de cendres produites

**III.8.1. Rendement utile**

Le rendement utile  $\eta_{utile}$  d'une chaudière est son rendement instantané lorsque le brûleur fonctionne. C'est le rapport entre la puissance contenue dans le combustible et la puissance thermique transmise à l'eau de chauffage, et définie :

$$\eta_{\text{utile}} = \frac{P_u}{P_i} = 1 - \frac{\text{Perte globale}}{\text{puissance introduite}} \quad \text{(III.11)}$$

$P_u$  : puissance utile de la chaudière ou puissance fournie à l'eau de chauffage.

$P_i$  : puissance contenue dans le combustible.

### III.8.1.1. Puissance introduite dans la chaudière

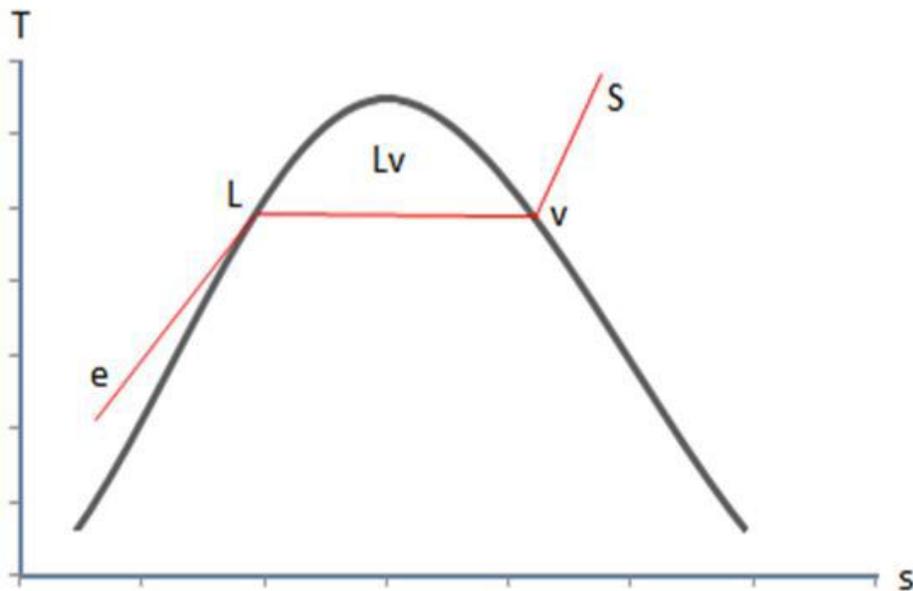
La puissance introduite dans la chaudière c'est la puissance contenue dans le combustible.

La puissance contenue dans la chaudière se définit comme :

$$P_i = M_{\text{comb}} \times \text{PCI} \quad \text{(III.12)}$$

### III.8.1.2. Puissance utile

L'eau entre dans la chaudière à l'état liquide puis il commence à se vaporiser et une fois vaporiser il subit une surchauffe jusqu'à une température  $T_{\text{surch}}$  qui est la température de sortie d'eau dans la chaudière.[16]



**Figure III.3 :** Diagramme de changement de phase de l'eau.

La formule de puissance utile se définit par la relation suivante :

$$P_{utile} = \dot{M}_e \times (h_s - h_e) \quad \text{(III.13)}$$

Avec :

$\dot{M}_e$ : Le débit d'eau

$h_e$ : L'enthalpie entrée d'eau liquide comprimée

$h_s$ : L'enthalpie de vapeur surchauffée

On peut calculer la puissance utile par une autre formule :

$$P_{utile} = P_i - \sum pertes \quad \text{(III.14)}$$

### **III.8.2. Pertes globales**

La perte globale représente la différence entre la chaleur totale apportée par le combustible et la chaleur effectivement reçue par le fluide à chauffer.

#### **1ère méthode directe**

$$P_{globales} = P_a - P_{utile} \quad \text{(III.15)}$$

#### **2ème méthode indirecte**

$$P_{globales} = \sum pertes = P_{fume} + P_{par} + P_{pur} \quad \text{(III.16)}$$

Parmi les pertes les plus typiques d'une chaudière on distingue

- Les pertes par les fumées.
- Les pertes par les parois.
- Les pertes par purge.

#### **III.8.2.1. Pertes par fumées**

Ces pertes représentent la chaleur emportée par les gaz chauds sortant de la cheminée, ce sont les pertes les plus importantes elles représentent environ (5 à 20 % de l'énergie entrante au générateur).

La formule se définit comme : [12]

$$P_{\text{fume}} = P_i \times \frac{10.8}{100} \quad \text{(III.17)}$$

### III.8.2.2. Pertes par parois de la chaudière

Ces pertes proviennent des échanges thermiques par convection et rayonnement entre les parois chaudes de la chaudière et l'air ambiant.

Ces pertes dépendent principalement de la géométrie de la paroi de la chaudière et de la nature du matériau. Une bonne isolation de la chaudière peut réduire considérablement ces pertes :

#### A. Pertes par rayonnement

Le rayonnement est l'émission d'ondes électromagnétiques par un corps chauffé.

Elles correspondent aux échanges thermiques entre la surface extérieure et l'ambiance est donnée par la formule définie : [17]

$$P_{\text{ray}} = \varepsilon \times \sigma \times S(T_{\text{par}}^4 - T_{\text{air}}^4) \quad \text{(III.18)}$$

Avec :

$P_{\text{ray}}$ : Pertes par rayonnement [W]

$\varepsilon$ : L'émissivité du matériau donnée par le thermomètre infrarouge [ $\varepsilon=0.95$ ]

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

#### B. Pertes par convection

La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un fluide (liquide ou gaz).

La quantité de chaleur transmise par convection entre une paroi solide et un fluide est exprimée par l'équation de Newton. [17]

$$P_{\text{conv}} = h \times S \times (T_{\text{par}} - T_{\text{air}}) \quad \text{(III.19)}$$

#### ➤ Définition du nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt, noté Nu, est un nombre sans dimension utilisé dans les études sur le transfert de chaleur. Il décrit le rapport entre le transfert de chaleur par convection et

le transfert de chaleur par conduction à travers une frontière et mesure l'efficacité du transfert de chaleur dans un fluide par rapport à la conduction pure, est donnée par la formule :

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

Donc :

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

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

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

Avec :

C et n : des coefficients de corrélations.

➤ **Définition du nombre du Rayleigh**

C'est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides et caractérisant le transfert de chaleur au sein d'un fluide, est défini par la relation suivant :

$$Ra = Gr \times Pr$$

➤ **Définition du nombre de Prandtl :**

Le nombre de Prandtl, une quantité sans dimension clé dans la dynamique des fluides, signifie le rapport entre la diffusivité de la quantité de mouvement et la diffusivité thermique.

Gr : nombre de Grashof est défini par la relation :

$$Gr = \frac{\beta \times g \times \Delta T \times D^3}{\nu^2}$$

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

$$Nu = 1,18 Ra^{0,125} \quad \text{si} \quad 10^{-3} < Ra < 5 \cdot 10^2$$

$$Nu = 0,54 Ra^{0,25} \quad \text{si} \quad 5 \cdot 10^2 < Ra < 2 \cdot 10^7$$

$$Nu = 0,13 Ra^{0,33} \quad \text{si} \quad 2 \cdot 10^7 < Ra < 10^{13}$$

### **III.8.2.3. Pertes par purges**

Ces pertes proviennent de la chaleur sensible des purges. Elles peuvent être réduites par un traitement adéquat d'alimentation et un bon système de retour de condensats. Ces pertes dépendent de la température et du débit des purges.

Les pertes par purges sont estimées de (1 à 5%). [18]

$$P_{\text{pur}} = P_i \frac{y}{100} \quad \text{(III.20)}$$

$P_i$  : puissance introduite [kW].

$P_{\text{pur}}$  : Pertes par purge [kW].

$y$  : l'estimation de perte par purge.

### **III.9. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons mené une étude approfondie de la combustion et effectué le calcul du bilan énergétique de la chaudière. Nous avons analysé les processus de combustion, identifié les facteurs influençant son efficacité et établi un bilan énergétique complet pour évaluer les performances de la chaudière.

Le prochain et dernier chapitre portera sur l'application pratique de ces calculs de bilan énergétique à la chaudière.

*Chapitre IV*  
*Application du bilan*  
*énergétique de la chaudière*

## IV.1. Introduction

Comme il a été mentionné précédemment, les calculs liés au bilan énergétique d'une chaudière sont fondamentaux pour évaluer et optimiser la performance du système de production de vapeur. Ce bilan énergétique consiste à analyser les flux d'énergie entrant et sortant de la chaudière pour déterminer son rendement global. Les principaux calculs incluent l'évaluation de l'énergie apportée par le combustible, ainsi que les différentes données thermodynamiques en chaque point clé de l'installation. A cela s'ajoute la quantification de l'énergie utile produite sous forme de vapeur, et l'identification des pertes d'énergie à travers les gaz de combustion, les rayonnements et les inefficacités mécaniques. En intégrant des paramètres tels que l'efficacité de la combustion, la température et la pression de la vapeur produite, ainsi que les pertes thermiques, ces calculs nous permettront de mieux appréhender le parcours de l'énergie dans l'installation.

## IV.2. Analyse énergétique de la bêche

### IV.2.1. Propriétés du fluide à l'entrée et la sortie de la bêche

Point	T(C°)	P (bar)	$M_B(t. h^{-1})$	h (kJ/Kg)
Entrée	25	4	30	104.13
Sortie	105	1.4	30	440.07

**Tableau IV.1:** Caractéristiques du fluide à l'entrée et la sortie de la bêche.

On a :

$$M_B = 30 \text{ t. h}^{-1}$$

$$M_B = \frac{30 \times 1000}{3600}$$

$$M_B = 8.4 \text{ kg. h}^{-1}$$

### IV.3. Analyse énergétique des pompes

Les pompes utilisées ont un rendement isentropique  $\eta_s = 80\%$

On a :

$$P_2 = 1.4 \text{ bar} = 1.4 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$P_3 = 66 \text{ bar} = 66 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Et d'après annexe :

$$\begin{cases} h_2 = 440.288 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \\ v = 0.00104743 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \end{cases}$$

$$W_{pps} = h_{3s} - h_2 = \int v dP$$

Donc :

$$h_{3s} = h_2 + \int v dP = h_2 + v(P_3 - P_2)$$

$$h_{3s} = 440.7 + 0.001476(66 - 1.4)$$

$$h_{3s} = 440.79534 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

On a :

$$\eta_s = \frac{h_{3s} - h_2}{h_3 - h_2}$$

D'où :

$$h_3 = h_2 + \frac{h_{3s} - h_2}{\eta_s}$$

$$h_3 = 440.7 + \frac{450.2349 - 440.7}{0.8}$$

$$h_3 = 452.6187 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

➤ **La puissance de la pompe**

$$W_{pp} = M_p(h_3 - h_2)$$

Avec :

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

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

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

Donc :

$$W_{pp} = 47.77 \times (452.6187 - 440.7)$$

$$W_{pp} = 569.449 \text{ kW}$$

#### IV.4. Analyse du brûleur

➤ **La puissance du brûleur**

La puissance « P » du brûleur dépend du débit «  $q_{gaz}$  » de gaz. Celui-ci peut être mesuré au niveau du compteur gaz. En première approximation, en négligeant l'influence de la pression et de la température sur le débit ainsi que la variation du pouvoir calorifique du gaz distribué, on peut déterminer la puissance du brûleur par :

$$P \text{ [kW]} = q_{gaz}[\text{m}^3/\text{min}] \times 60[\text{min}/\text{h}] \times 10[\text{kWh}/\text{m}^3]$$

$$\text{Gaz de brûleur : } 6988 \text{ Nm}^3$$

L'unité  $\text{Nm}^3$  est utilisée pour standardiser les mesures de gaz, car les volumes de gaz varient avec la température et la pression. En utilisant des conditions normales (ou standard), on peut comparer des quantités de gaz de manière cohérente. Les conditions normales typiques sont :

- Température :  $0^\circ\text{C}$  ( $273.15 \text{ }^\circ\text{K}$ )
- Pression :  $1\text{atm}$  ( $101.325 \text{ kPa}$ )

$$1\text{Nm}^3 \text{ de gaz} \rightarrow 1.055\text{m}^3$$

$$6988 \text{ Nm}^3 \text{ de gaz} \rightarrow x$$

$$x = 6988 \times 1.055 = 7372.34 \text{ m}^3$$

$$7372.34 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 12287.2333 \text{ m}^3 / \text{min}$$

Donc

$$P = 122.872333 \times 60 \times 10$$

$$P = 73723.398 \text{ kW}$$

$$P = 73 \text{ MW}$$

#### IV.5. Analyse de l'économiseur

On a :

$$C_p = 4.18 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$$

$$T_4 = 105 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_5 = 205 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Avec

$$M_{ecn} = 1720 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$M_{ecn} = \frac{172 \times 1000}{3600}$$

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

##### ➤ La puissance de l'économiseur

$$Q_{ecn} = M_{ecn} C_p (T_5 - T_4)$$

$$Q_{ecn} = 47.77 \times 4.18 (205 - 105)$$

$$Q_{ecn} = 19.96786 \text{ kW}$$

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

$M_{ecn}$  : Débit massique de l'économiseur [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$C_p$ : chaleur spécifique de l'eau [ $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ]

## IV.6. Analyse énergétique de ballon de la chaudière

### ➤ La puissance du ballon

$$Q_B = M_B \times (P_{max} - P_{min})$$

Avec

La température constant [ $T_B = 205^\circ\text{C}$ ]

$$P_{max} = 66\text{bar} = 66 \times 10^5\text{Pa}$$

$$P_{min} = 55\text{bar} = 55 \times 10^5\text{Pa}$$

On a

$$M_B = 172 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

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

$$M_B = 74.7 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Q_B = 74.7 \times (66 \times 10^5 - 55 \times 10^5)$$

$$Q_B = 82170000 \text{ kW}$$

## IV.7. Analyse énergétique de la SBT

Entrée

On a :

$$T_e = 274^\circ\text{C} , P_e = 55 \text{ bar}$$

Il est nécessaire de réduire l'écart de pression qui génère la circulation

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

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

$$M_{eSBT} = 39.2 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Sortie :

On a :

$$P_s = 55.7 \text{ bar}$$

$$T_s = 463^\circ\text{C}$$

$$M_{sSBT} = 142 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$M_{S_{SBT}} = \frac{142 \times 1000}{3600}$$

$$M_{S_{SBT}} = 39.4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

➤ **La puissance de la SBT :**

$$C_p = \text{capacité calorifique de l'eau} = 4.18 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$$

$$Q_{SBT} = M_{S_{SBT}} \times C_p \times (T_s - T_e)$$

$$Q_{SBT} = 39.4 \times 4.18 \times (463 - 274)$$

$$Q_{SBT} = 31126.788 \text{ W}$$

$$Q_{SBT} = 31.1267 \text{ kW}$$

## IV.8. Analyse énergétique de la SHT

**Entrée**

$$P_{e_{SHT}} = 55.4 \text{ bar}, T_{e_{SHT}} = 395 \text{ }^\circ\text{C}$$

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

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

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

**Sortie**

$$P_{s_{SHT}} = 55.2 \text{ bar}, T_{s_{SHT}} = 480 \text{ }^\circ\text{C}$$

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

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

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

## ➤ La puissance de la SHT

$$Q_{SHT} = M_{sSHT} \times C_p \times (T_s - T_e)$$

$$Q_{SHT} = 41.6 \times 4.18 \times (480 - 395)$$

$$Q_{SHT} = 14780.48 \text{ W}$$

$$Q_{SHT} = 14.78048 \text{ kW}$$

**IV.9. Analyse énergétique de la chaudière****IV.9.1. Puissance introduite dans la chaudière**

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

Donc :

$$P_i = M_{comb} \times PCI_{gaz}$$

Ou :

$P_i$  : Puissance introduite

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

PCI : Pouvoir calorifique inférieur de gaz naturel

AN :

$$P_i = 4.95836 \times 20422.6792$$

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

**IV.9.2. La puissance utile**

$$P_{utile} = \dot{M}_e \times (h_s - h_e)$$

Etat thermodynamique :

$$\begin{cases} P = 66 \text{ bar} \\ T_E = 105^\circ\text{C} \\ T_S = 480^\circ\text{C} \end{cases}$$

Et d'après annexe :

$$P_{utile} = 29.16 \times (3381.42 - 445.073)$$

$$P_{utile} = 85623.8785 \text{ kW}$$

### IV.9.3. Différentes pertes

#### ➤ 1ère méthode directe

$$P_{globale} = P_i - P_{utile}$$

$$P_{globale} = 101298.94 - 85623.8785$$

$$P_{globale} = 15675.061 \text{ kW}$$

#### ➤ 2ème méthode indirecte

### IV.9.4. Pertes par parois

#### IV.9.4.1. Pertes par rayonnement

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

Avec

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon = 0.96 \\ \sigma = 5.667 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \\ S = 620 \text{ m}^2 \\ T_{paroi} = 345.15 \text{ K} \\ T_{air} = 297.05 \text{ K} \end{array} \right.$$

$$P_{ray} = 0.96 \times 5.667 \times 10^{-11} \times 620(345.15^4 - 297.05^4)$$

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

#### IV.9.4.2. Pertes par convection

$$P_{conv} = h \times S(T_{paroi} - T_{air})$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{paroi} = 345.15 \text{ K} \\ T_{air} = 297.05 \text{ K} \\ S = 620 \text{ m}^2 \\ D = 5 \text{ m} \end{array} \right.$$

Le coefficient d'échange convectif de la chaleur s'exprime par la relation :

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

D'après l'annexe 1 :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\text{air}} = 297.05 \text{ k} \\ P_r = 0.7309 \\ \lambda = 2.514 \times 10^{-2} \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} \end{array} \right.$$

Calcul du nombre de Nusselt :

$$\text{Nu} = c \times \text{Ra}^n$$

Calcul du nombre de GRASHOF :

$$\text{Gr} = \frac{\beta \times g \times \Delta T \times D^3}{\nu^2}$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} g = 9.81 \text{ m.s}^{-2} \\ \beta = 3.5009 \times 10^{-3} \\ \Delta T = 48.1 \\ D = 5 \text{ m} \\ \nu = 1.516 \times 10^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1} \end{array} \right.$$

Donc :

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

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

Dans notre cas

$$\text{Ra} = \text{Pr} \times \text{Gr}$$

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

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

Avec :

$$\begin{cases} n = 0.25 \\ c = 0.54 \end{cases}$$

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

$$Nu = 2465.0865$$

Donc

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

$$h = 0.08266 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Finalemment on obtient :

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

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

Enfin

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

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

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

#### IV.9.5. Pertes par fumée

En théorie on prend les pertes de fumée 10% et nous avons utilisé un analyseur de fumée qui nous a donné 10.8% de la puissance introduit. [12]

Pi correspond à 100%

$P_{fume}$  Correspond 10.8%

On a :

$$P_{fum} = \frac{Pi \times 10.8}{100}$$

$$P_{f\text{um}} = \frac{101298.94 \times 10.8}{100}$$

$$P_{f\text{um}} = 10940.2855 \text{ kW}$$

#### IV.9.6. Pertes par purge

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

On a :

$$\begin{cases} P_i = 101298.94 \text{ kW} \\ y = 1.8 \end{cases}$$

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

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

#### IV.9.7. Pertes globales d'une chaudière

Les pertes globales sont :

$$\sum \text{Pertes} = P_{f\text{um}} + P_{\text{par}} + P_{\text{pur}}$$

$$\sum \text{pertes} = 10940.2855 + 2685.7123 + 1823.38092$$

$$\sum \text{Pertes} = 15449.3787 \text{ kW}$$

#### IV.9.8. Rendement de combustion

$$\eta_{\text{comb}} = \frac{P_i - P_{f\text{um}}}{P_i}$$

$$\eta_{\text{comb}} = \frac{101298.94 - 10940.2855}{101298.94}$$

$$\eta_{\text{comb}} = 89.2 \%$$

## IV.9.9. Rendement utile

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

$$\eta_{utile} = \frac{85623.8785}{101298.94}$$

$$\eta_{utile} = 84.52\%$$

## IV.9.10. Discussion et analyse des résultats

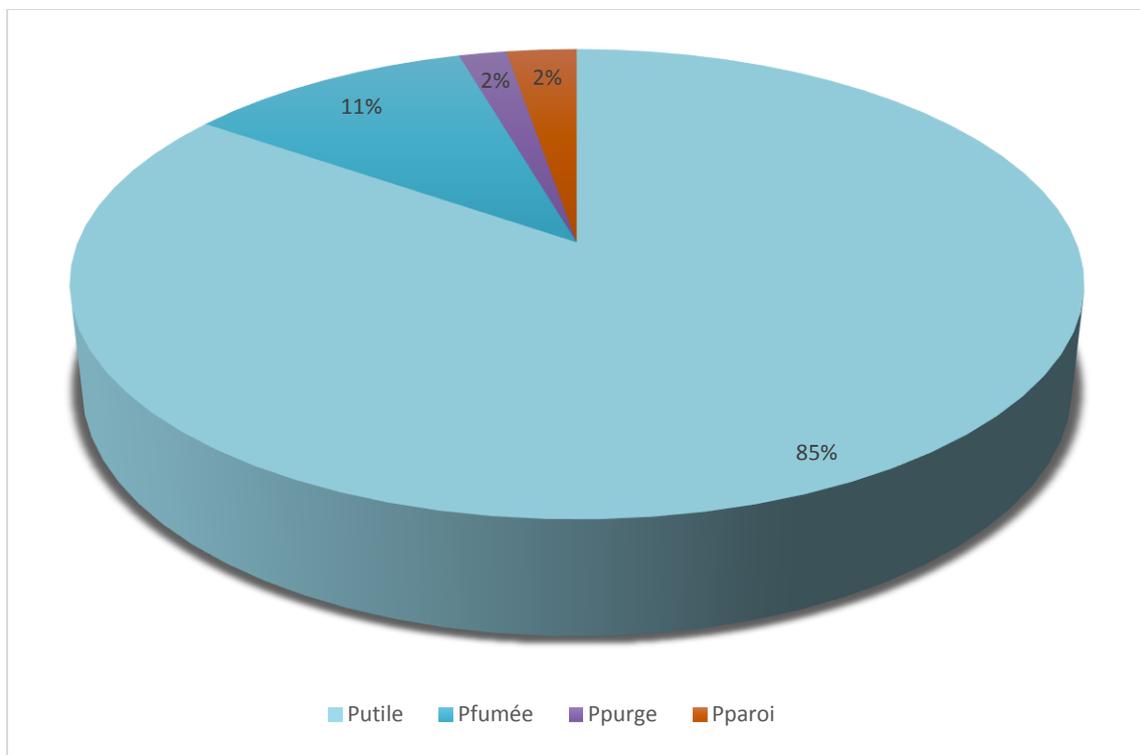
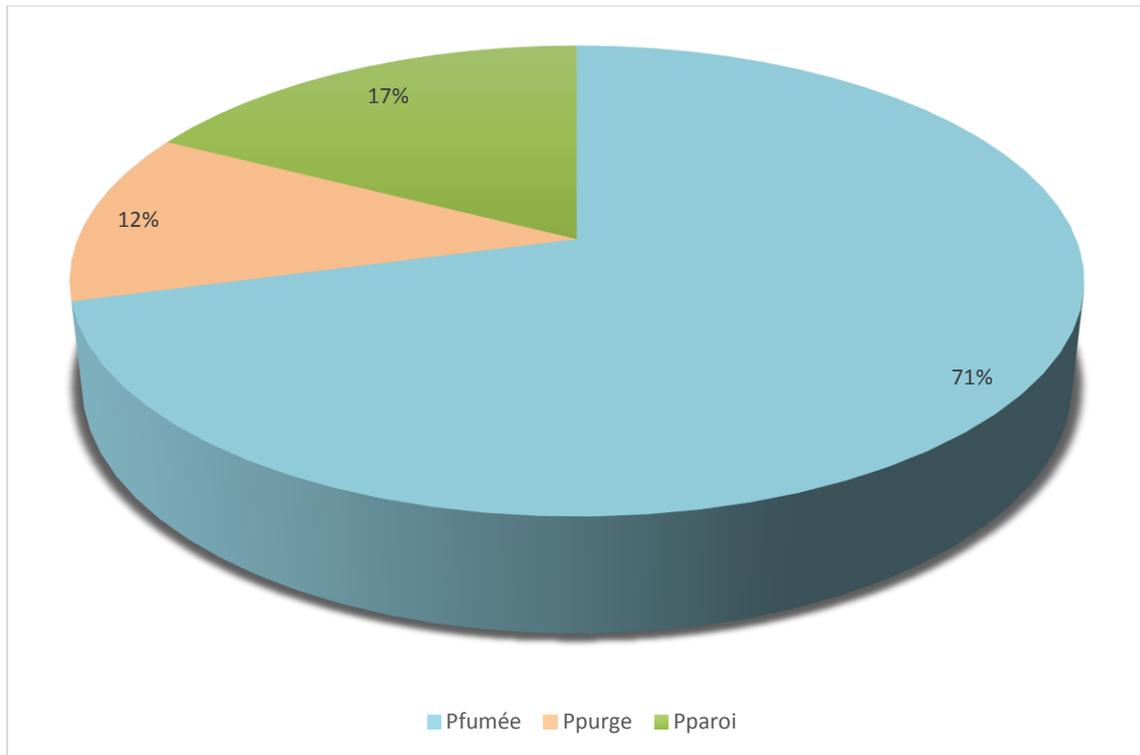


Figure IV.1 : Bilan énergétique de la chaudière STEIN



**Figure IV.2 : Pertes globales**

### Discussion et analyse des résultats

D'après les résultats obtenus, le rendement calculé est inférieur à celui annoncé par le constructeur (85%), ce qui s'explique par les pertes. Les calculs montrent que les pertes par les fumées sont plus importantes que les autres types de pertes. Cela indique que les pertes par les fumées ont une influence significative sur le rendement de la chaudière. Ces pertes peuvent être attribuées à un excès d'air excessif, causé par :

- Un mauvais réglage du brûleur.
- Des problèmes d'entretien, comme une mauvaise distribution de l'air.

### IV.10. Conclusion

Ce chapitre a appliqué les principes de bilan énergétique à une chaudière à tube d'eau haute pression, révélant des informations cruciales sur son rendement et ses pertes énergétiques. Les principaux résultats incluent l'identification des principales sources de pertes, le calcul du rendement thermique. Ces analyses fournissent une base solide pour améliorer les performances de la chaudière et réduire son impact environnemental.

## *Conclusion Générale*

## *Conclusion Générale*

---

L'amélioration de l'efficacité énergétique dans les systèmes industriels est cruciale à plusieurs égards. D'une part, elle permet de réduire les coûts de production et de renforcer la compétitivité. D'autre part, elle est nécessaire pour se conformer aux nouvelles normes environnementales.

Notre stage chez CEVITAL a été une opportunité précieuse pour appliquer nos connaissances théoriques en énergétique acquises à l'université de Bejaïa. Le projet que nous avons mené nous a permis d'approfondir notre compréhension du processus de combustion, de la production de vapeur et des paramètres influençant le rendement des chaudières.

L'analyse énergétique que nous avons réalisée s'est concentrée sur l'évaluation thermodynamique de la chaudière, en calculant les pertes spécifiques de cette chaudière et en analysant son rendement. Cette étude a révélé des opportunités significatives d'amélioration même pour des installations réputées performantes.

En guise de recommandations, nous proposons plusieurs pistes d'amélioration :

- Optimiser le traitement de l'eau d'alimentation pour prévenir l'encrassement des chaudières.
- Effectuer un nettoyage régulier des surfaces d'échange par le ramonage.
- Utiliser des isolants thermiques efficaces.
- Conduire une étude approfondie, à la fois théorique et expérimentale, sur l'excès d'air optimal dans la chaudière.
- Réaliser des analyses périodiques pour surveiller les performances.

Cependant, l'amélioration du rendement des chaudières permet de réduire la consommation de combustible, les émissions de  $CO_2$  et  $CO$  dans l'atmosphère, tout en protégeant les équipements contre l'entartrage et la corrosion. En résumé, il est possible de produire tout en préservant l'environnement et en économisant de l'énergie.

## *Références bibliographiques*

- [1] Christophe. A, « Chaudières à vapeur à combustible ». Enseignant de BTS CIRA Lycée Pilote Innovant », Édition du 2007.
- [2] Cheridi. A. L, « Etude Numérique du transitoire accidentel d'une chaudière industrielle par le code Relap5/Mod3.2 », Université Constantine 1,2013.
- [3] Alain. R, Jean-Pierre. D, « technique de l'ingénieur différents types de chaudières industrielles Génie énergétique », 1993.
- [4] NEMDILI. Ali, livre : formation chaudières, « Exploitation et Maintenance des Chaudières».
- [5] Dizier .M, Les chaudières. Tome B1, Techniques de l'ingénieur, 1984.
- [6] Rahmani. A, « Modélisation et simulation thermo hydraulique d'un générateur de vapeur industriel en régime transitoire par le code RELAP5/Mod3.2 », doctorat en physique Energétique, Université Badji Mokhetar- Annaba, 2007.
- [7] : S. Joël, - A quoi Sert la Cogénération -, Enerpresse Forum, Dalkia, 16 Septembre (2008).
- [8] : 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.
- [9] : G. Gouy, - Sur les transformations et l'équilibre en thermodynamique. Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences, Gauthiere - Villars Fils, Paris, (1889).
- [10] : P. Dewallef, -La Cogénération Principe et Applications-, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 26 mars (2013).
- [11] : JEAN CLAUDE. S. « Nouvelles technologies de l'énergie : stockage a émission réduite», Edition hermés, 2007.
- [12] : Documentation interne de CEVITAL.
- [13] : « Fonctionnement et exploitation d'une centrale thermoélectrique à vapeur » partie1 apave.
- [14] : Pascal. B, « cour de combustion industrielle », Université Paul Sabatier de Toulouse.

[15] : [http : //www.memoireonline.com](http://www.memoireonline.com), « Optimisation de la facture énergétique par L'amélioration système de production d'énergie ».

[16] : Borel. L, « Thermodynamique et énergétique », Volme1-, Presses Polytechniques et Universitaires, Romandes ,2004.

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

[18] : 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).

# *Annexes*

## Annexes

### Annexe 01

		Entrée	Sortie
Pompe	Pression (bar)	1,4 (Tsat=109,292°C)	66 (Tsat=281,875°C)
	Température (°C)	105	105
	Etat physique	Liquide comprimé	Liquide comprimé
	Enthalpie (kJ/kg)	440,288	445,073
	Entropie (kJ/kg.K)	1,36333	1,35812
	Volume massique (m <sup>3</sup> /kg)	0,00104743	0,0010441
	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	954,713	957,763
		Entrée	Sortie
Economiseur	Pression (bar)	66 (Tsat=281,875°C)	66 (Tsat=281,875°C)
	Température (°C)	105	205
	Etat physique	Liquide comprimé	Liquide comprimé
	Enthalpie (kJ/kg)	445,073	876,746
	Entropie (kJ/kg.K)	1,35812	2,36971
	Volume massique (m <sup>3</sup> /kg)	0,0010441	0,00115935
	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	957,763	862,551
		Entrée	Sortie
Ballon	Pression (bar)	66 (Tsat=281,875°C)	55 (Tsat=269,965°C)
	Température (°C)	205	274
	Etat physique	Liquide comprimé	Vapeur surchauffée
	Enthalpie (kJ/kg)	876,746	2807,86
	Entropie (kJ/kg.K)	2,36971	5,96394
	Volume massique (m <sup>3</sup> /kg)	0,00115935	0,03636
	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	862,551	27,5028
		Entrée	Sortie

*Annexes*

SBT	Pression (bar)	55 (Tsat=269,965°C)	55,7 (Tsat=270,775°C)
	Température (°C)	274	463
	Etat physique	Vapeur surchauffée	Vapeur surchauffée
	Enthalpie (kJ/kg)	2807,86	3340,29
	Entropie (kJ/kg.K)	5,96394	6,80545
	Volume massique (m <sup>3</sup> /kg)	0,03636	0,0577393
	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	27,5028	17,3192
		Entrée	Sortie
SHT	Pression (bar)	55,4 (Tsat= 270,429°C)	55,2 (Tsat= 270,197°C)
	Température (°C)	395	480
	Etat physique	Vapeur surchauffée	Vapeur surchauffée
	Enthalpie (kJ/kg)	3174,18	3381,42
	Entropie (kJ/kg.K)	6,57092	6,86463
	Volume massique (m <sup>3</sup> /kg)	0,0512242	0,0599395
	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	19,522	16,6835

**Annexe 02**

**Présentation de l'entreprise CEVITAL - BEJAIA**

**1.1. Introduction**

Dans cette partie nous parlerons de l'évolution chronologique du complexe, ses multiples activités industrielles, ses principaux objectifs, ainsi que l'organigramme décrivant ses différentes directions.

**1.2. Présentation générale de l'entreprise**

CEVITAL est parmi les grandes entreprises qui possèdent un grand parc matériel sophistiqué tel que le système de cogénération et c'est ce qui nous a poussé à opter pour un thème au sein de ce complexe.

**1.2.1. Historique**

CEVITAL est parmi les entreprises algériennes qui ont vu le jour dès l'entrée de notre pays dans l'économie de marché. Elle a été créée par des fonds privés en 1998. Son complexe de production se situe dans le port de Bejaia et s'étend sur une superficie de 45000m<sup>2</sup>. CEVITAL contribue largement au développement de l'industrie agroalimentaire nationale, elle vise à satisfaire le marché national et exporter le surplus, en offrant une large gamme de produits de qualité. En effet les besoins du marché national sont de 1200T/j d'huile l'équivalent de 12 litres par personne et par an. Les capacités actuelles de CEVITAL sont de 18000T/j, soit un excédent commercial de 600T/j.

Les nouvelles données économiques nationales dans le marché de l'agroalimentaire, font que les meilleurs sont ceux qui maîtrisent d'une façon efficace et optimale les coûts, les charges et ceux qui offrent le meilleur rapport qualité/prix.

Ceci est nécessaire pour s'imposer sur le marché que CEVITAL négocie avec les grandes sociétés commerciales internationales. Ses produits se vendent aujourd'hui dans plusieurs pays, notamment en Europe, au Maghreb, au moyen orient et en Afrique de l'ouest.

### 1.2.2. Situation géographique

Implanté au sein du port de Bejaïa à 3 km du sud-ouest du centre de cette ville qui lui offre une place stratégique et économique (entre le port et l'aéroport de Bejaïa), et il s'étend sur une superficie de 14 hectares, le Complexe Cevital- Bejaïa est composée de plusieurs unités telle que : raffinerie de sucre, raffinerie d'huile, margarinerie ainsi qu'un terminal de déchargement portuaire.

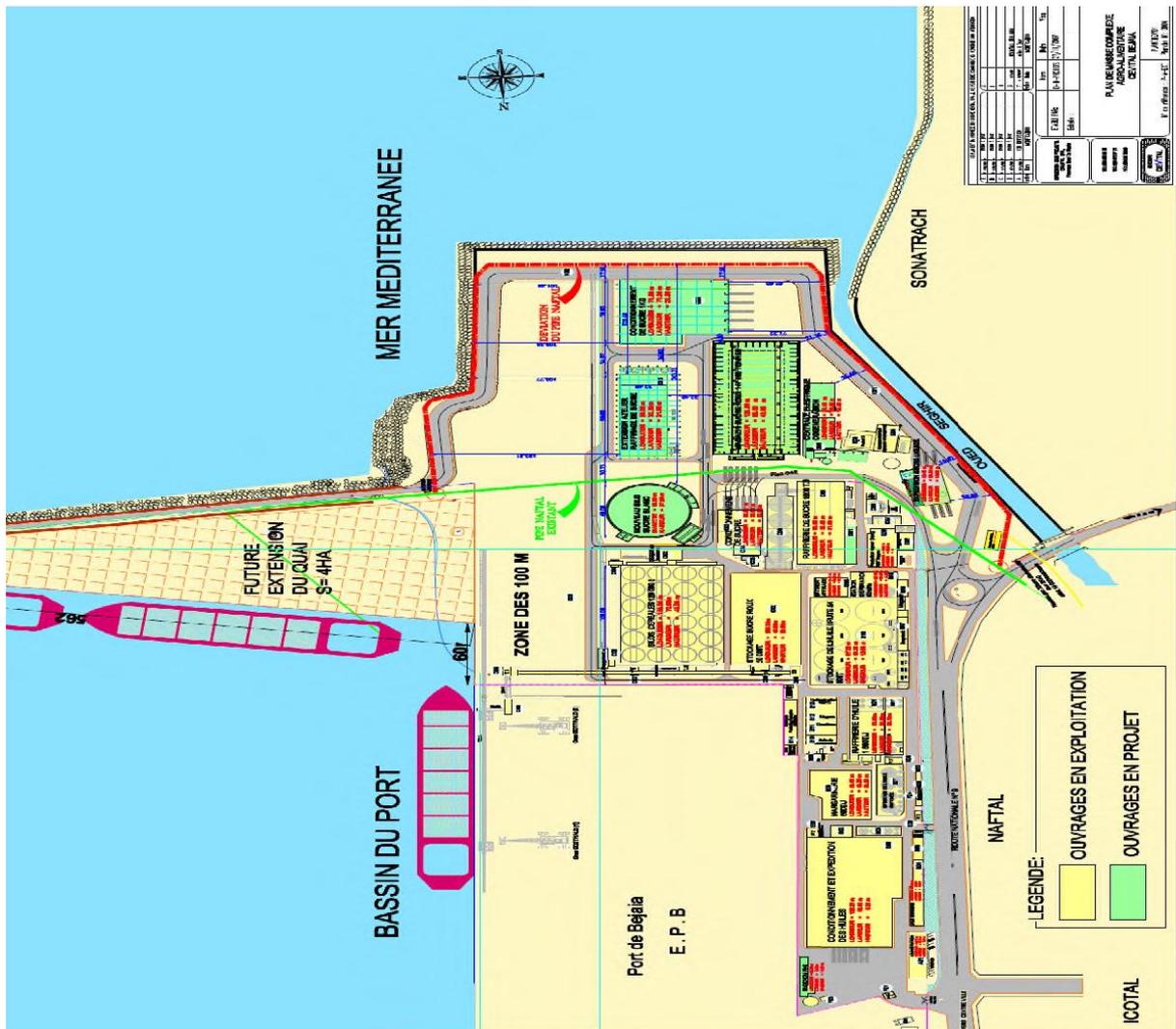


Figure IV.3 : Situation géographique du Complexe CEVITAL

### 1.2.3. Activités de CEVITAL

Lancée en Mai 1998, le complexe CEVITAL a débuté son activité par le conditionnement de l'huile en Décembre de la même année. En Février 1999, les travaux de construction et

de montage de la raffinerie ont débutés, cette dernière est devenue fonctionnelle en Août 1999.

C'est en l'an 2000 que le projet de construction d'une raffinerie de sucre voit le jour et c'est deux ans après exactement en octobre qu'elle lance la production.

L'ensemble des activités de CEVITAL sont concentrés sur la production et la commercialisation des huiles végétales, de margarine et de sucre. Elles se présentent comme suit :

- Raffinage des huiles.
- Conditionnement d'huiles finies.
- Production de margarine.
- Fabrication d'emballage PET (Poly Ethylène Téréphtalate).
- Raffinage du sucre roux.
- Stockage céréales.

#### **1.2.4. Missions et objectifs**

L'entreprise a pour mission principale de développer la production et d'assurer la qualité et le conditionnement des huiles, des margarines et du sucre à des prix nettement plus compétitifs, et cela dans le but de satisfaire le client et de le fidéliser.

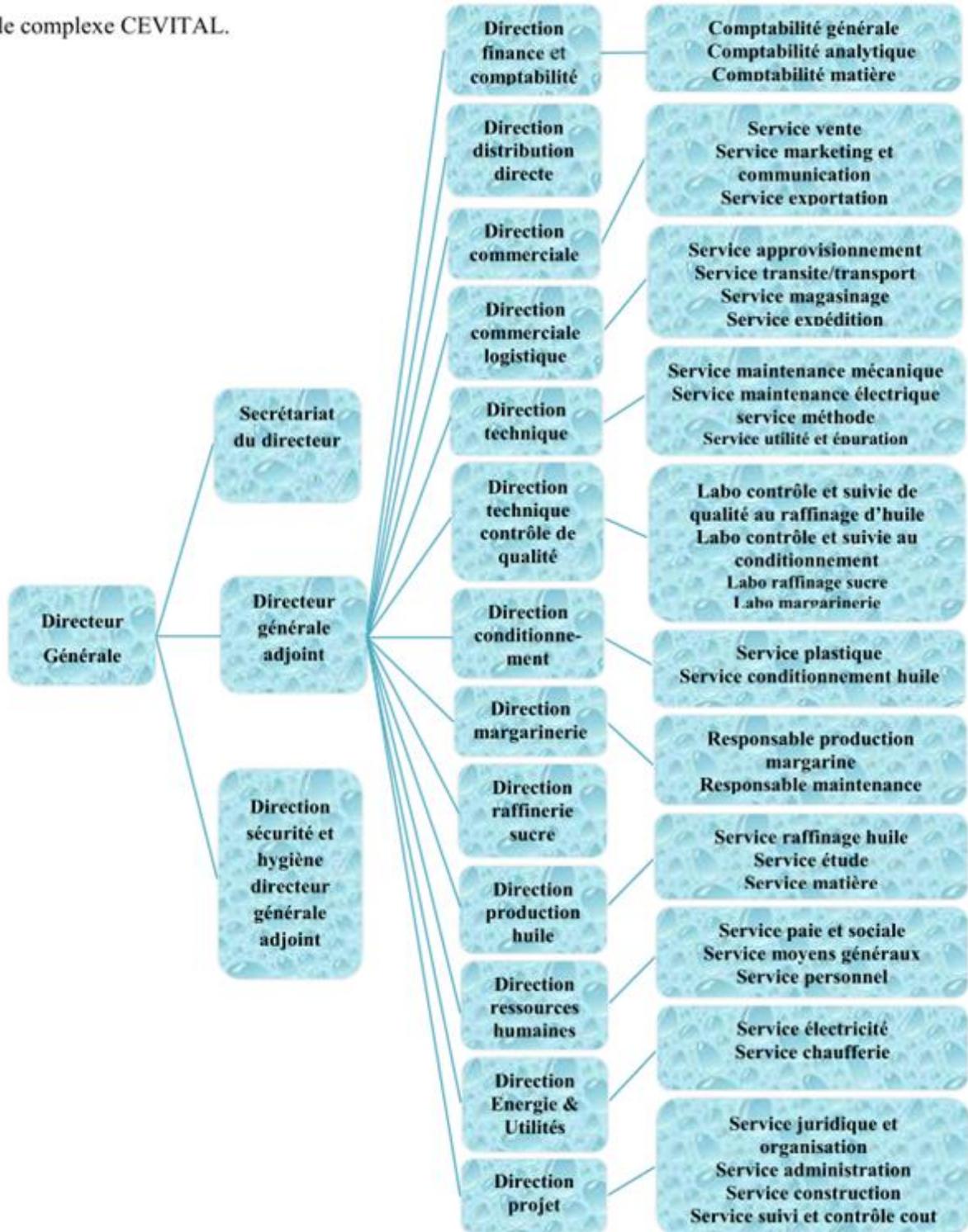
Les objectifs visés par CEVITAL peuvent se présenter comme suit :

- L'extension de ses produits sur tout le territoire national.
- L'implantation de graines oléagineuses pour l'extraction directe des huiles brutes.
- L'optimisation de ses offres d'emploi sur le marché du travail.
- L'encouragement des agriculteurs par des aides financières pour la production locale de graines oléagineuses.
- La modernisation de ses installations en termes de machine et de technique pour augmenter le volume de sa production.
- Positionner ses produits sur le marché international par leurs exportations.

### 1.2.5 Différents organes constituant le complexe CEVITAL

L'organigramme suivant donne une vue général sur les différents organes constituant le complexe CEVITAL.

le complexe CEVITAL.



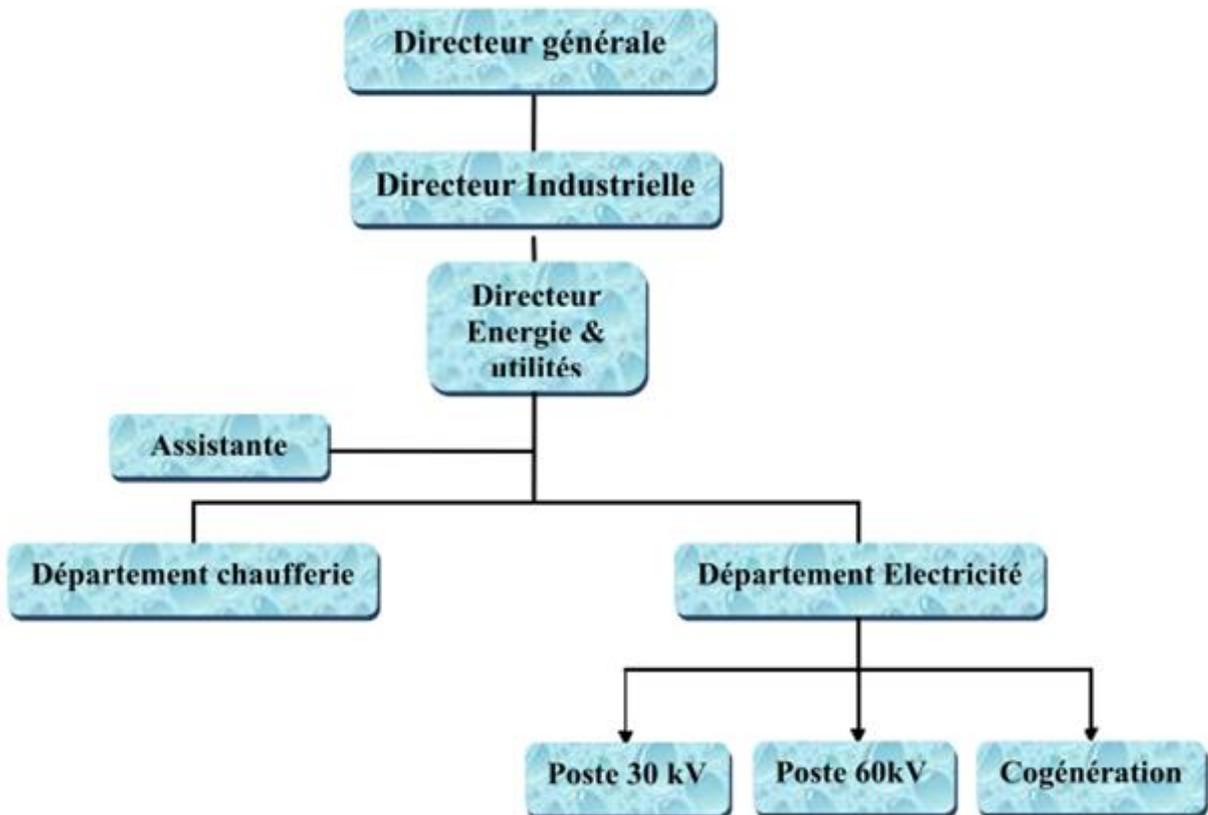
**Organisation du complexe CEVITAL.**

**1.2.6 Direction énergie et utilités**

La direction Energie est constituée de deux départements qui sont :

- Département électricité (production et distribution de l'énergie électrique).
- Le poste 60 kV;
- Le poste 30 kV;
- La cogénération ;
- Département chaufferie (production et distribution de la vapeur).

Les différents départements de la direction Energie sont représentés dans l'organigramme suivant, Figure (1.3) :



**Organisation de la direction énergie.**

## Annexe 03

048  
**PROPERTIES 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	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-5}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

Note: For ideal gases, the properties  $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$ , and Pr are independent of pressure. The properties  $\rho$ ,  $\nu$ , and  $\omega$  at a pressure  $P$  (in atm) other than 1 atm are determined by multiplying the values at  $\rho$  at the given temperature by  $P$  and by dividing  $\nu$  and  $\omega$  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. Hestermann, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

# *Vérification du bilan énergétique de la chaudière haute pression, CEVITAL(Bejaia)*

## *Résumé*

Le projet de fin d'études porte sur le calcul du bilan énergétique d'une chaudière. Il se concentre sur l'analyse approfondie des flux d'énergie entrants et sortants de la chaudière afin d'évaluer son efficacité thermique. L'étude inclut la modélisation des processus de combustion et de production 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 recommandations pour réduire les pertes et améliorer son rendement global.

**Mots clés :** Chaudière – Rendement énergétique – Thermodynamique – Convection – Transfert de chaleur-Energétique – Combustion.

## *Abstract*

The final-year project involves calculating the energy balance of a boiler. It focuses on an in-depth analysis of the energy flows entering and leaving the boiler, in order to assess its thermal efficiency. The study includes the modeling of combustion and steam production processes, as well as the identification and quantification of heat losses. The main objective is to optimize the boiler's energy performance by proposing recommendations for reducing losses and improving its overall efficiency.

**Keywords :** Boiler - Energy efficiency - Thermodynamics - Convection - Heat transfer-Energy - Combustion.

## *المخلص*

مشروع السنة النهائية يتضمن حساب توازن الطاقة لغلاية. يركز على تحليل معمق لتدفقات الطاقة الداخلة والخارجة من الغلاية، بهدف تقييم كفاءتها الحرارية. تشمل الدراسة نمذجة عمليات الاحتراق وإنتاج البخار، بالإضافة إلى تحديد وفحص خسائر الحرارة. الهدف الرئيسي هو تحسين الأداء الطاقى للغلاية من خلال اقتراح توصيات لتقليل الخسائر وتحسين الكفاءة العامة لها.

**الكلمات المفتاحية:** غلاية - كفاءة الطاقة - الديناميكا الحرارية - الحمل الحراري - نقل الحرارة - الطاقة - الاحتراق.