

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : ÉNERGÉTIQUE

PAR :

KOUCHARI ADEM

FAIDI BELKACEM

Thème

**Calcul du rendement d'une chaudière à vapeur à circulation
naturelle – Sonelgaz, SPE, Jijel**

Soutenu le 05/11/2020 devant le jury composé de:

Mr.Benslimane A.

Président

Mr.Djerrada A.

Rapporteur

Mr.Hamdi M.

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2019-2020

Remerciements

La rédaction de ce mémoire et sa soutenance marquent la fin d'une aventure à plusieurs facettes : aventure dans le monde de la recherche, qui ne devrait pas en rester là, aventure humaine, aventure familiale. Différentes personnes nous ont accompagnés tout au long de ce parcours et nous tenons ici à remercier :

Le Seigneur Dieu tout puissant, pour nous avoir accordés vie, santé et paix de l'esprit sans quoi nous n'aurons pas pu achever ce travail ;

Nos parents : qui nous ont toujours donnés le maximum de ce qu'ils pouvaient. Vous nous avez épaulés dans les moments difficiles et toujours été un exemple dans le travail.

Notre encadreur Mr A. DJERRADA nous avons eu l'honneur d'être parmi vos étudiants et de bénéficier de votre riche enseignement. Vos qualités pédagogiques et humaines sont pour nous un modèle. Votre gentillesse, et votre disponibilité permanente ont toujours suscité notre admiration. Veuillez monsieur recevoir nos remerciements pour le grand honneur que vous nous avez fait en acceptant l'encadrement de ce travail.

Les membres du jury et le Président du Jury : Messieurs les jurys, vous nous faites un grand honneur en acceptant de juger ce travail.

Nous devons aussi un remerciement à tous les enseignants pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges professionnelles. Ainsi qu'au département Génie Mécanique et au corps scientifiques et pédagogiques de l'Université Abderrahmane Mira de Bejaia.

Nous tenon à remercier chaleureusement, tous les travailleurs de SonelgazSPE de Achouat-Jijel et plus particulièrement Mr R. KESSASERA, nous remercions également tous nos proches et tous ceux qui, de près ou de loin, nous apporté leurs aide pour l'accomplissement ce travail.

ADEM et BELKACEM

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents ;Mohamed, Hanifa, source de mes joies, secret de ma force, qui m'ont inlassablement aidé, soutenu au long de toute ma vie. Vous serez toujours mon modèle, que Dieu vous bénisse.

Mes frères;Mohamed Tahar, Charif, Abdel-Raouf,Kheireddine qui m'ont aidé durant cette formation et qui m'ont soutenu de près comme de loin afin de réussir mes études.

Mes belles-sœurs, Fatiha, Emina Fatima zohra, Khaoula, Nawal,et les petits anges Arwa, Rawa, Elena, Mahdouch, Razane, Yanis, Leticia.

Ma grand-mère ; Ouiza,que Dieu la garde dans son vaste paradis, et à maMa grand-mère; Mliha que Dieu vous protège.

Mes amis ;L'Bine, Haled,Belka, Ninas, Zohir, Achour, Mohamed, Said,Ilyas, Abid, Hakim, Massi, Moncif.

Ainsi qu'à moncherBelkacem binôme que j'estime beaucoup et à qui je souhaite pleine de réussite.

Et enfin à toutes les personnes que j'aime.

Adam
Adam

DEDICACE

Avec l'expression de ma connaissance je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour a ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverai jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A ma chère mère, qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais cessé de formuler des prières à mon égard et n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux.

A mon cher père, tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, que ce travail traduit mon affection et la confiance qu'il m'a accordé, et pour le goût à l'effort qu'il a suscité en moi, de par sa rigueur.

A mes chères grandes sœurs Hadjer, Yasmine et ma petite sœur Demboul (nifus kerbi3us) et aussi à O.KT qui n'ont cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout a long de mes études. Que dieu les protèges et leurs offre la confiance et le bonheur.

A mon binôme Ademkouchari, pour son soutien moral, sa sympathie et sa compréhension tout au long de ce projet.

A mes chersamis, Ninas, Zouhir et Ademmerci pour leurs aides et supports dans les moments difficiles et leur soutien.

A toutes les personnes de ma grande famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci d'être toujours là pour moi.

FAIDI Belkacem

Sommaire

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Sommaire.....	III
Table des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	V
Nomenclature.....	VI
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les générateurs de vapeur	2
I.1. Introduction.....	2
I.2. Principe de fonctionnement de la central thermique à vapeur.....	2
I.3. Générateur de vapeur.....	2
I.3.1. Définition.....	2
I.3.2. Classification des générateurs de vapeur.....	3
I.3.2.1. Selon la matière.....	3
I.3.2.2. Selon la conception.....	4
I.3.2.2.Selon les modes de circulation.....	8
I.4. Ballon de chaudière.....	9
I.5. Economiseur.....	10
I.6. Colonnes de descente et écrans vaporisateurs.....	11
I.7. Les tubes écrans	11
I.8. Les échangeurs de chaleur.....	12
I.9. Surchauffeurs.....	12
I.10. Resurchauffeurs.....	13
I.11. Chambre de combustion.....	13
I.12. Circuit d'air et de fumées.....	13
I.12.1. Ventilateurs de soufflage.....	13
I.12.2. Réchauffeur d'air rotatif.....	13
I.12.3. Ventilateurs de recyclage.....	14
I.13. Cheminée.....	14
I.14. Mode de fonctionnement du générateur de vapeur de la centrale de Jijel.....	14

I.15. Les problèmes dans la chaudière.....	17
I.15.1. Manque d'eau.....	17
I.15.2. Rupture des tubes.....	18
I.15.3. Mauvaise combustion.....	18
I.16. Le système de régulation dans la chaudière.....	18
I.17. Performances attendues et conditions générales d'utilisation.....	20
I.17.1 Caractéristiques liées à la conception.....	20
I.17.2. Caractéristiques de l'eau et de la vapeur.....	21
I.17.3. Caractéristiques du combustible.....	21
I.18. Rendement nominal ou rendement utile.....	21
I.19. Eau d'alimentation et eau d'appoint.....	23
I.20. Objectifs du traitement de l'eau.....	24
I.20.1. Absence de tartre.....	24
I.20.2. Absence de corrosion.....	24
I.20.3. Vapeur de bonne qualité.....	25
I.20.4. Sécurité.....	25
I.20.5. Phénomènes liés à la qualité d'eau.....	25
I.20.6. Origines et causes des phénomènes.....	26
I.21. Systèmes de purge de chaudières.....	29
I.22. Sources de dégradation du rendement énergétique de chaudière.....	29
I.22.1 Perte dans le rendement de la combustion.....	29
I.22.2. Pertes vers l'ambiance.....	30
I.22.3. Pertes par formation du SO ₃	31
I.22.4. Pertes par formation de l'acide sulfurique.....	31
I.22.5. Perte énergétique avec les purges de déconcentration.....	32
I.22.6. Pertes énergétiques avec les eaux de purge d'une chaudière.....	33
I.22.7. Pertes d'énergie du système de distribution.....	33
I.23. Influence de la température de fumées sur le rendement de la chaudière.....	34
I.24. Influence des gaz dissous de la qualité de l'eau d'alimentation sur la vapeur vapeur.....	34
I.25. Amélioration du rendement de la chaudière.....	35
I.25.1 Maximiser le retour du condensat chaud.....	35
I.25.2. Récupération des pertes de chaleur de la chaudière.....	35

I.26. Amélioration de l'efficacité énergétique.....	37
Chapitre II : Méthodes de calcul du rendement du générateur de vapeur.....	42
II.1.Introduction.....	42
II.2. Définition de la combustion.....	42
II.3. Type de combustion.....	42
II.3.1. La combustion théorique (neutre)	42
II.3.1.1 Résultat de la combustion neutre (théorique)	42
II.3.2. La combustion réelle.....	43
II.4.Détermination de rendement de la chaudière en fonctionnement normal par la méthode indirecte.....	44
II.4.1. Détermination des puissances.....	45
II.5. Détermination des pertes thermiques.....	46
II.5.1. Perte de chaleur dans les fumées sèches (<i>Lg</i>)	47
II.5.2. Perte de chaleur due à l'humidité dans le combustible (<i>Lmf</i>)	48
II.5.3. Perte de chaleur due à l'humidité dérivante de la combustion de l'hydrogène du combustible (<i>Lh</i>)	48
II.5.4. Pression partielle.....	49
II.5.5. Perte de chaleur due à l'humidité dans l'air (<i>Lma</i>)	49
II.5.6. Pertes par rayonnement et convection (<i>l_B</i>)	49
II.5.7. Perte de chaleur due à la formation d'oxyde de carbone (<i>Lco</i>)	50
II.6. Puissance introduite (<i>P_{int}</i>)	50
II.6.1. Quantité de chaleur introduite (<i>Q_{int}</i>)	50
II.6.2. Pouvoir calorifique supérieur (<i>PCS</i>)	50
II.6.3. Chaleur sensible fournie au combustible (<i>B_{fe}</i>)	50
II.6.4. Équivalent thermique de la puissance fournie à la chaudière(<i>B_{xe}</i>).....	51
II.7. Puissance utile.....	52
II.8. Détermination du rendement de la chaudière.....	52
II.9. Calcul du rendement de générateur de vapeur par la méthode directe.....	52
Chapitre III : Résultats et interprétations.....	54
III.1. Données sur l'application.....	54
III.2 calculs et résultats.....	59
III.2.1.Calcul du rendement par la méthode directe.....	59

III.2.2. Calcul du rendement par la méthode indirecte.....	63
Conclusion générale.....	65
Reference bibliographique.....	66
Annexe.....	67
Annexe [A] : script du programme MATLAB pour calculé la consommation spécifique et le rendement par la méthode directe.....	67
Annexe [B] : script du programme MATLAB pour calculé le rendement par la méthode indirecte.....	68
Résumé/Abstract.....	69

Table des figures

Figure I.1 : Principe de production d'énergie électrique	2
Figure I.2 : Schéma générale d'une centrale avec son générateur de vapeur	3
Figure I.3 : Chaudière à tubes de fumées.....	4
Figure I.4 : Chaudière à tubes d'eau	5
Figure I.5 : Schéma type d'une Chaudière à tubes d'eau.....	6
Figure I.6 : Principe de la circulation naturelle.....	8
Figure I.7 : Principe de la circulation forcée.....	9
Figure I.8 : Ballon de chaudière.....	9
Figure I.9 : Coupe transversale du ballon de chaudière.....	10
Figure I.10 : Economiseur.....	11
Figure I.11 : Transfert de la chaleur par radiation dans la chambre de combustion de la Chaudière.....	11
Figure I.12 : Echangeur de chaleur	12
Figure I.13 :Schéma de principe de fonctionnement d'un surchauffeur.....	12
Figure I.14 : Bruleurs dans la chambre de combustion	13
Figure I.15 : Réchauffeur d'air rotatif.....	14
Figure I.16 : Principe de fonctionnement de la chaudière	15
Figure I.17 : Bilan thermique dans la chambre de combustion	16
Figure I.18 : Schéma d'une chaudière à tubes d'eau	16
Figure I.19 : Incidents sur les chaudières.....	17
Figure I.20 : Pertes d'une chaudière lorsque son brûleur est en fonctionnement	22
Figure I.21 : Evolution du contenu des fumées avec l'excèsd'air [%] de combustion.....	23

Figure I.22 : Dégradation des éléments concernés	27
Figure I.23 : Dégâts des dépôts d'encrassement dans la surface d'échange.....	28
Figure I.24 : Dépôt d'encrassement dans la surface d'échange	28
Figure I.25 : Variation des pertes vers l'ambiance en fonction de la puissance	30
Figure I.26 :Economiseur en bon état et Economiseur encrassé	32
Figure I.27 :Programme d'amélioration de l'efficacité des chaudières	37
Figure I.28 :Équilibre énergétique type d'une chaudière ou d'un système de chauffage (avant les améliorations)	38
Figure II.1 :Diagramme de la combustion	44
Figure II.2 : Représentation schématique du bilan thermique d'un générateur à vapeur	45
Figure II.3 : Schéma du circuit air, fumée de la chambre.....	46
Figure II.4 : détermination des enthalpies dans la chaudière.....	53
Figure III.1 : Schéma de la centrale de Jijel.....	56
Figure III.2 : Schéma de la chaudière.....	60

Liste des tableaux

Tableau II.1 :Présentation et évaluation des résultats de la combustion neutre	42
Tableau III.1 :Liste des participants dans la construction de la centrale thermique de Jijel.....	55
Tableau III.2 : Relevé des paramètres, de la charge 100% du 2ème groupe.....	57
Tableau III.3 :Données spécifiques des groupes de la centrale de Jijel	58
Tableau III.4 : Consommation électrique des différents équipements de la centrale.....	59
Tableau III.5 : Composition en volume du gaz naturel utilisé	60
Tableau III.6 :Propriétés thermodynamiques dans les différents points de la chaudière	62
Tableau III.7 : Tableau récapitulatif.....	63

NOMENCLATURE

Symboles	Définition	Unité (SI)
B_{fe}	Chaleur sensible fournie au combustible	-
B_{xe}	Thermique de la puissance fournie à la chaudière	-
$C_b ; s$	Teneur en carbone et en soufre dans le combustible	-
C_{p_m}	Chaleur spécifique moyenne des fumées.	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_b	Masse de carbone brûlé	kg/kg comb
C_b	Masse de carbone brûlé kg/kg de masse de combustible alimenté .	-
CP_c	La chaleur spécifique moyenne du combustible.	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
CP_c	La chaleur spécifique moyenne du combustible.	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_{purge}	Concentration en sel eau de purge	-
C_{alim}	Concentration en sel eau d'alimentation	-
$G_{combustible}$	Débit de combustible	kg/s
H_2	Enthalpie de la vapeur à pression	kJ/mol
H_{vap}	Enthalpie de vapeur saturée à T_{ref} .	kJ/mol
h	Teneur en dihydrogène (H_2) du combustible en %	-
H_1	Enthalpie du liquide saturée à T_{ref}	kJ/mol
H_2	Enthalpie de la vapeur à pression Partielle de l'humidité et à Tf'_2 .	kJ/mol
I_B	Pertes par rayonnement et convection	$kcal/h$
L_g	Perte de chaleur dans les fumées sèches.	-
L_{mf}	Perte de chaleur due à l'humidité dans le combustible.	-
L_h	Perte de chaleur due à l'humidité dérivante de la combustion	-
L_{ma}	Perte de chaleur due à l'humidité dans l'air.	-
L_B	Pertes par rayonnement et convection.	-
L_{CO}	Perte de chaleur due à la formation d'oxyde de carbone.	-
L_b	Puissance perdue par rayonnement ; estimée par le constructeur.	W
L_g	Perte de chaleur dans les fumées sèches	$kcal/h$
L_{mf}	Perte de chaleur due à l'humidité dans le combustible	$kcal/h$
L_h	Perte de chaleur due à l'humidité	$kcal/h$

L_{ma}	Perte de chaleur due à l'humidité dans l'air	kcal/h
L_{co}	Perte de chaleur due à la formation d'oxyde de carbone	kcal/h
mois	La teneur en humidité.	-
mg	Masse de l'humidité dans les fumées.	g/m^3
Pa	Pression atmosphérique.	Pa
P_a	Puissance contenue dans le combustible	W
P_c	Le pouvoir énergétique du combustible.	kJ/kmol
P_i	Le pouvoir énergétique du composant.	kJ/kmol
P_u	Puissance utile de la chaudière	W
P_{RAR}	Puissance du moteur électrique de réchauffeur d'air rotatif.	W
P_{VR}	Puissance du moteur électrique de ventilateur de recyclage.	W
P_{int}	Puissance introduite	W
PCS	Pouvoir calorifique supérieur	kW.h
Q_v	Débit volumique dans les conditions normales	Nm^3/h
q_1	Perte par chaleur sensible	kcal/h
q_2	Perte par imbrulées	kcal/h
q_3	Perte par refroidissement extérieur	kcal/h
QF	Chaleur fournie par heure	kW/h
Q_{int}	Quantité de chaleur introduite	W
q_r	Pourcentage de réduction due aux pertes vers l'ambiance	-
Q_{purge}	Débit d'eau de purge	m^3/s
Q_{vapeur}	Débit de vapeur	m^3/s
QF	Chaleur fournie par heure	kW/h
Q_g	Le débit massique de combustible.	kg/s
$T_{f'_2}$	Température corrigée des fumées	K
T_{f_1}	Température d'essai fumées à l'entrée de réchauffeur d'air rotatif.	K
T_{f_2}	Température d'essai fumées à la sortie de réchauffeur d'air rotatif.	K
T_{al}	Température d'essai à la sortie de ventilateur de soufflage.	K
T_{ref}	Température de référence.	K
T_{amb}	Température ambiante d'essai.	K
T_{amb-p}	Température ambiante de projet.	K
V	Volume molaire normal ($v=22.413$)	$Nm^3/kmol$
W	Chaleur produite par heure	kW/h

W_g	Masse de gaz de combustion kg/kg de masse de combustible.	-
W_{ma}	Humidité absolue dans l'air.	g/m^3
W_a	Masse d'air sec rapportée à la masse du combustible.	kg_{airs}/kg_{comb}
X_i	Fraction molaire du composant	-
η_{RAR}	Rendement nominale du moteur électrique de réchauffeur d'air rotatif.	-
η_{VR}	Rendement nominale du moteur électrique de ventilateur de recyclage.	-
η_{comb}	Rendement de combustion	-
η_{utile}	Rendement utile	-

Introduction Générale

Introduction Générale

"Rien ne se perd, rien ne se crée, tous se transforme"...

Partant de ce principe, l'homme n'a cessé d'exploiter la nature pour ses besoins, des fois même sans le vouloir, dans la vie on peut trouver diverses formes d'énergie (vitesse du vent, l'eau, la chaleur du soleil, force des animaux,...)qui sont toutes naturelles, et à partir desquelles l'homme ne cesse de créer d'autres sortes d'énergie selon ses besoins (mécanique, chimique, thermique, électrique,..), des fois, il faut même passer d'une énergie à une autre pour pouvoir créer une troisième sorte d'énergie qu'on peut utiliser.

L'industrie utilise couramment la vapeur comme énergie nécessaire à la réalisation de nombreux et variés procédés. La vapeur est un fluide caloporteur disponible en grande quantité, facilement transportable et non toxique. La production de vapeur demande l'utilisation d'un combustible et l'utilisation d'un générateur de vapeur (chaudière). De plus la production de vapeur couplée à une turbine électrique permet 75% de la production mondiale d'électricité. La chaudière est un appareil (voir une installation industrielle, selon sa puissance) permettant de transférer en continu de l'énergie thermique à un fluide caloporteur (le plus généralement de l'eau). L'énergie thermique transférée (source de chaleur) peut être soit la chaleur dégagée par la combustion (de charbon, de fioul, de gaz, de bois, de déchets, etc.), soit la chaleur contenue dans un autre fluide (chaudière de récupération sur gaz de combustion ou gaz de procédés chimiques, chaudière « nucléaire » recevant la chaleur du circuit primaire etc, soit encore d'autres sources de chaleur (chaudières électriques, par exemple). Les chaudières sont aussi bien des systèmes industriels que domestiques. À l'intérieur de la chaudière, ce fluide caloporteur peut être soit uniquement chauffé (c'est-à-dire qu'il reste en phase liquide), soit chauffé et vaporisé, soit chauffé, vaporisé puis surchauffé (donc avec passage de la phase liquide à la phase gazeuse).

Dans ce travail on s'est intéressé aux causes de dégradation du rendement de la chaudière de la centrale thermique de Jijel.

Pour mener à bien notre travail nous avons subdivisé ce manuscrit en quatre chapitres Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les générateurs de vapeur et au fonctionnement du générateur de vapeur (chaudière) de la centrale de Jijel etau causes de dégradation du rendement de chaudière.

Le second contient les méthodes de calcul du rendement d'une chaudière.

Le troisième porte sur le calcul du rendement de la chaudière de la centrale thermique de Jijel par les deux méthodes directe et indirecte et nous terminerons par une conclusion.

Chapitre I

Généralités sur les générateurs de vapeur

I.1.Introduction

La production d'électricité dépend en grande partie de la production de vapeur générée par la chaleur produite soit à partir du charbon, du gaz, ou par fission nucléaire de l'uranium. Les techniques de production et d'utilisation de la vapeur font donc appel à d'importants aspects de la technologie de l'ingénierie.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter les différentes parties d'une chaudière, et enfin aboutir à l'étude de la technologie pour voir l'importance de construction de ces dernières.

I.2.Principe de fonctionnement de la centrale thermique

La centrale utilise l'énergie fournie par la combustion d'un gaz naturel qui constitue la source de chaleur. L'objectif est de faire chauffer de l'eau à partir de la chaleur libérée afin de disposer d'une vapeur. Cette vapeur sous pression permet d'entraîner à grande vitesse une turbine accouplée à un alternateur qui transforme l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique produisant une tension alternative sinusoïdale. À la sortie de la turbine, la vapeur est condensée et transformée en eau réutilisée comme source de vapeur et effectue alors un cycle thermodynamique [1]. Le principe de production de l'électricité dans la centrale peut donc être schématisé comme suit :

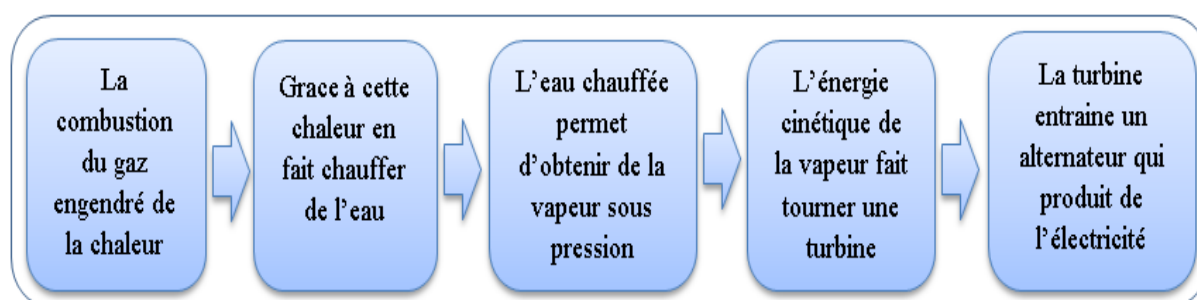


Figure I.1 :Principe de production d'énergie électrique.

I.3.Générateur de vapeur

I.3.1.Définition

Le générateur de vapeur est un dispositif permettant de chauffer l'eau et de produire de la vapeur, son rôle est essentiellement de transmettre de l'énergie apparaissant sous forme de chaleur à de l'eau sous pression pour obtenir soit de l'eau surchauffée sous pression, soit de la vapeur surchauffée. De plus, les chaudières à vapeur de grande puissance sont en général associées à une turbine à vapeur pour produire de l'énergie électrique. La Figure I.2 montre un générateur de vapeur dans une centrale électrique.

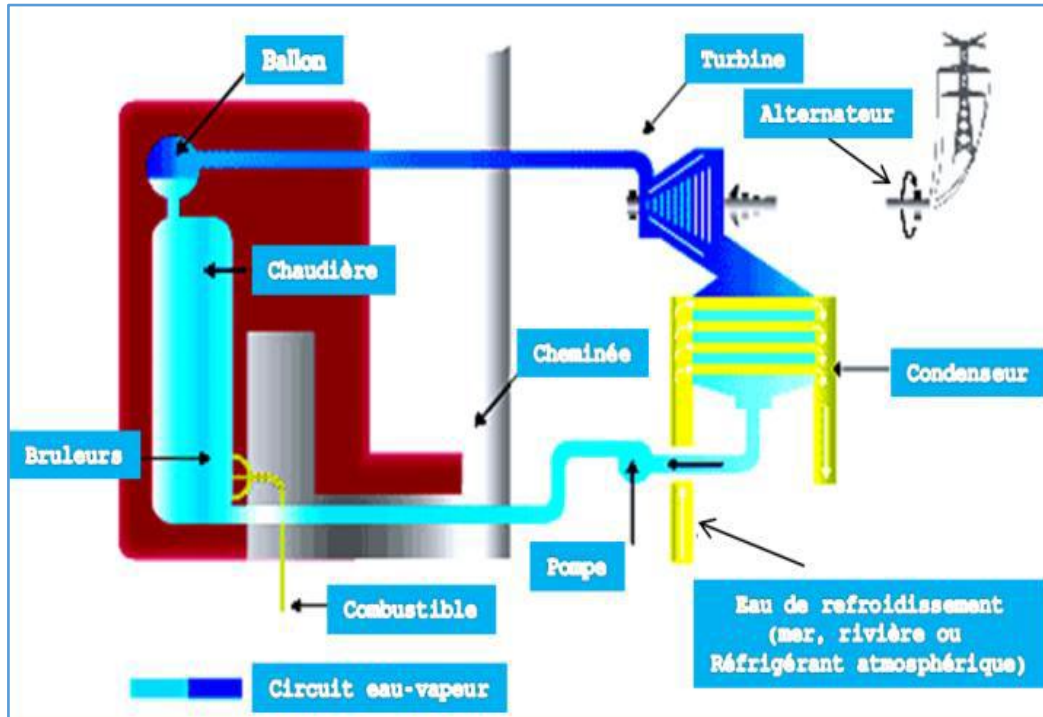


Figure I.2 :Schéma générale d'une centrale avec son générateur de vapeur. [1]

I.3.2. Classification des générateurs de vapeur

Les générateurs de vapeur peuvent être classés selon divers paramètres : de conception, du mode de circulation, du support et du mode d'emploi.

I.3.2.1. Selon la matière

a) Chaudières en fonte

Les différents éléments d'une chaudière en fonte sont obtenus par moulage à partir d'un modèle. Les chaudières en fonte se rencontrent dans la gamme des petites et moyennes puissances (puissances inférieures à 2000t/h). Ce sont généralement des chaudières à eau chaude.

b) Chaudières en acier

Les chaudières en acier sont obtenues par soudage à partir de tôles et de tubes. Il est alors possible de réaliser les formes les plus diverses. Ces chaudières sont utilisées pour toutes les gammes de puissances. Ce type de construction est indispensable pour les appareils à forte pression contenant de l'eau (à plus de 110°C) ou de la vapeur (à plus de 50 bars).

I.3.2.2. Selon la conception

Deux types de générateurs sont disponibles :

- Générateurs de vapeur à tubes de fumée.
- Générateurs de vapeur à tubes d'eau.[2]

a- Les chaudières à tubes de fumées

Les chaudières à tubes de fumées sont le plus généralement des petites chaudières générant de la vapeur saturée à une pression inférieure à une vingtaine de bars. Une chaudière à tubes de fumées est constituée d'un grand réservoir d'eau traversé par des tubes dans lesquels circulent les fumées. Le premier tube du parcours de fumées est un tube de plus gros diamètre qui constitue le foyer. Ce type de construction est aujourd'hui utilisé presque exclusivement pour les combustibles gazeux et liquides. Le schéma ci-dessous présente la vue éclatée d'une chaudière à tubes de fumées.

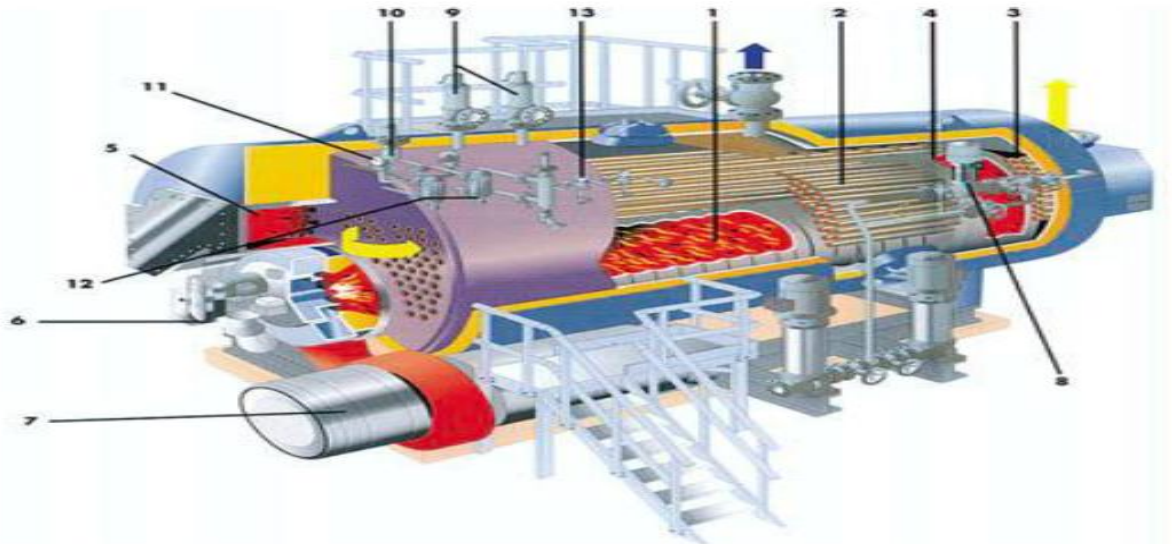


Figure I.3 :Chaudière à tubes de fumées. [2]

La chaudière à tubes de fumées est composée principalement des éléments suivants :

- | | |
|----------------------------------|--|
| 1. Foyer | 2. Tube de fumée 2ème passe |
| 3. Tube de fumée 3ème passe | 4. Boite arrière à refroidissement par eau |
| 5. Chambre de combustion | 6. Brûleur |
| 7. Ventilateur de combustion | 8. Vanne de régulation |
| 9. Soupape de sécurité | 10. Indicateur de niveau de sécurité d'eau |
| 11. Manomètre | 12. Indicateur de niveau à glace |
| 13. Bloc d'isolement + manomètre | |

-Principaux avantages des chaudières à tubes de fumée

- Équipement compact, livré entièrement monté et testé, peu coûteux
- Tubes droits aisés à entretenir
- Sa forte capacité en eau permet d'espacer la surveillance des dosages de produits de traitement
- Répondre sans risque de niveau d'eau trop bas, aux augmentations de besoin de vapeur du réseau
- La large section de dégagement de la vapeur favorise la production d'une vapeur sèche

Principaux inconvénient

- L'encombrement au sol est important
- La conception limite les débits de production et les pressions de travail
- La production de vapeur surchauffée nécessite une coûteux surchauffeur additionnel

b- Les chaudières à tubes d'eau

Les parois d'une chaudière à tubes d'eau sont constituées de panneaux de tubes munis d'ailettes longitudinales opposées permettant de les souder entre eux et de réaliser ainsi une construction étanche. Ces parois délimitent le volume dans lequel les gaz de combustion circulent le long des surfaces d'échanges [3].



Figure I.4 : Chaudière à tubes d'eau. [3]

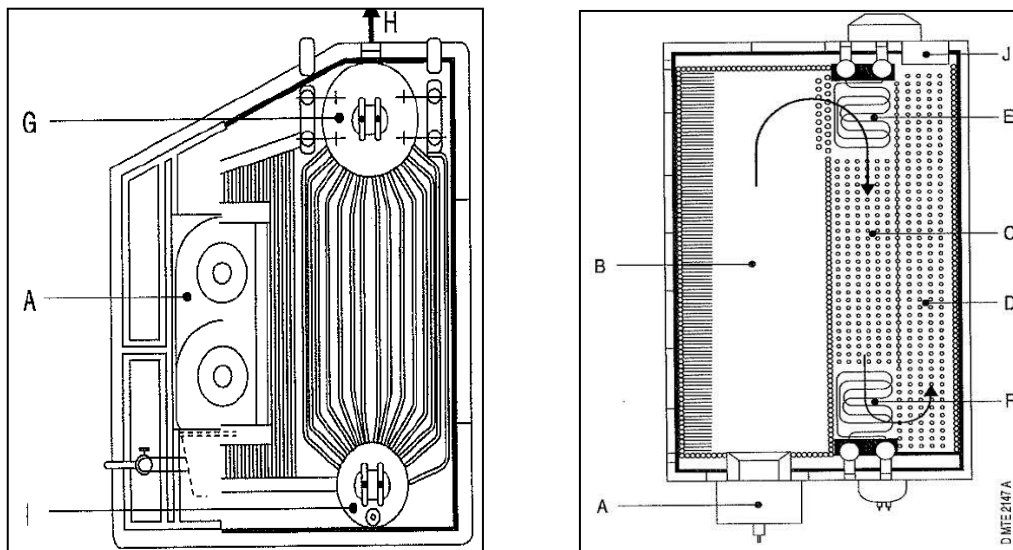


Figure I.5 :Schéma type d'une Chaudière à tubes d'eau. [3]

On distingue sur la Figure I.5 :

- **La chambre de combustion (B)** dans laquelle se développent les flammes produites par **les bruleurs (A)**. Les tubes jointifs qui constituent les parois de la chambre sont soumis au rayonnement des flammes. À l'extrémité de la chambre de combustion, des tubes sont déformés en sorte que, disposés en quinconce, ils permettent l'accès des fumées à la zone de convection.
- **Le circuit d'échange par convection** comprenant deux parcours pour les fumées. Dans le premier parcours (C) se trouvent placés les éventuels surchauffeurs (E) et (F). Le deuxième parcours D achève la récupération de chaleur sur les fumées. Les tubes constituant les parois de la chaudière et les zones d'échange (C) et (D) aboutissent à deux ballons :
 - **le ballon supérieur (G)** réalise la séparation des deux phases liquides et vapeur. La vapeur saturée sort par H avant d'alimenter les surchauffeurs ;
 - **le ballon inférieur(I)** alimente en eau liquide tous les tubes dans lesquels l'eau soumise à l'apport de chaleur se vaporise partiellement avant de retourner au ballon supérieur (J).[3]

Principaux avantages des chaudières à tubes d'eau

- Autorise un fonctionnement à pression et température élevées (jusqu'à 200 bars et 500°C).
- Permet la production de vapeur surchauffée par la simple addition de tubes dédiés à la surchauffe.
- Variations de charge rapides et sur une grande amplitude.

Principaux inconvénients

- La faible quantité d'eau en circulation, oblige à une surveillance accrue des dosages de produits de traitement.
- En raison de sa faible inertie, la capacité d'alimentation en eau doit répondre aussi rapidement que la demande supplémentaire en vapeur.

Les générateurs de vapeur à tubes d'eau sont généralement classifiés selon 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.

I.3.2.2.Selon les modes de circulation

Le rôle de la circulation de l'eau ou de l'émulsion d'eau et de vapeur dans les tubes de la chaudière est d'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 à cette partie, le flux maximal de chaleur, et d'autre part, d'assurer la génération de la vapeur saturée, c'est-à-dire, le passage du fluide chauffé de l'état eau à l'état émulsion eau et vapeur. Il y a deux types principaux de circulation, la circulation naturelle et la circulation forcée.

a- Circulation naturelle

Elle s'établit d'elle-même dans les circuits de la chaudière. Elle est assurée par la différence de poids entre deux colonnes de fluides, l'une contenant uniquement de l'eau, et l'autre un mélange d'eau et de vapeur. Il en résulte que la circulation est d'autant plus intense que la différence de masse volumique entre l'eau et la vapeur est plus grande.

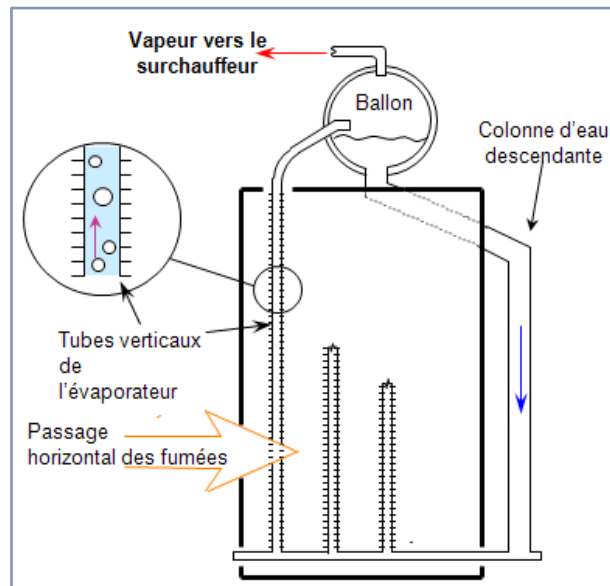


Figure I.6 :Principe de la circulation naturelle. [2]

La limite pratique d'utilisation de la circulation naturelle est de 180 bars. Dans les chaudières à circulation naturelle on détermine les débits d'eau à l'entrée des différents circuits de façon à ce que l'ébullition se fasse en tout point sous forme nucléée[2], ce qui garantit un bon refroidissement des tubes vaporisateurs. Il faut noter que la circulation naturelle dont le principe est schématisé par la Figure I.6, est meilleure lorsque la pression est basse, la hauteur motrice est plus grande à condition que les pertes de charge ne deviennent pas trop importantes, et la partie de chauffage soit située en partie basse des écrans. [2]

b- Circulation forcée

La circulation d'eau dans une telle chaudière dont le principe est illustré par la Figure I.7, est assurée par les pompes d'alimentation dont la hauteur de refoulement est déterminée en tenant compte de la perte de charge totale des circuits évaporateurs et surchauffeurs. Cette circulation permet une grande liberté dans la conception des circuits, puisque la circulation est toujours assurée. Dans les chaudières à circulation forcée, l'eau étant vaporisée en totalité, le régime de vaporisation par film instable, puis par film stable s'établit nécessairement dans les parties finales du circuit, il faut alors contrôler que la vitesse de l'émulsion est suffisante pour assurer le refroidissement du tube.[2]

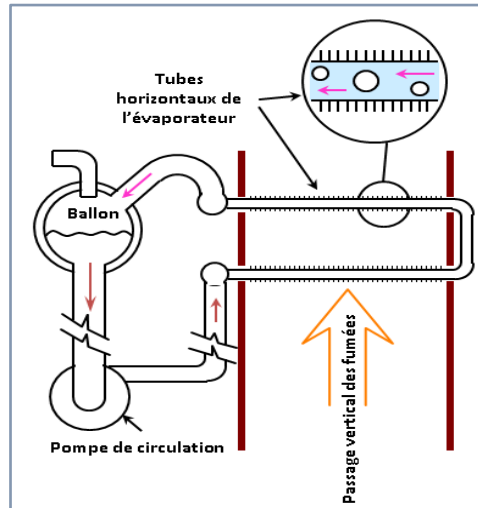


Figure I.7 :Principe de la circulation forcée. [2]

I.4.Ballon de chaudière

Élément principal dans la chaudière, le réservoir est le lieu où elle reçoit le mélange d'eau et de vapeur qui provient des tubes d'écran et de faisceaux vaporisateurs. Le ballon est un gros cylindre horizontal (Figures I.8et I.9) à parois épaisse qui se trouve à la partie supérieure de la chaudière et dont le rôle est multiple, 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.



Figure I.8 :Ballon de chaudière. [2]

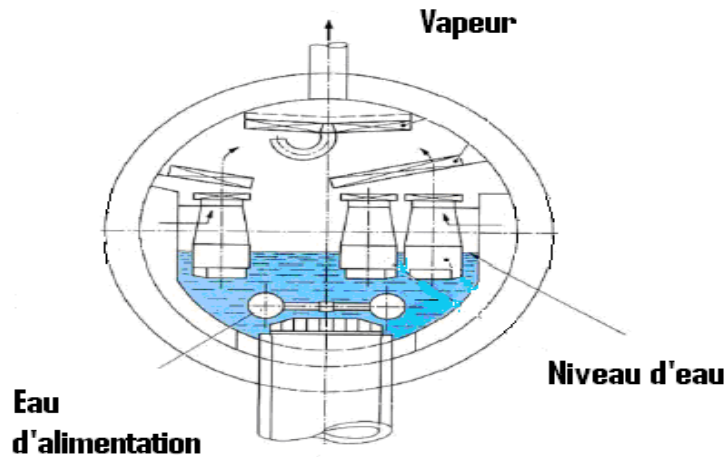


Figure I.9 : Coupe transversale du ballon de chaudière. [2]

Il est disposé transversalement et sert à stocker l'eau et la vapeur dans la chaudière. La moitié inférieure reçoit l'eau d'alimentation réchauffée dans l'économiseur et la moitié supérieure reçoit la vapeur venant des tubes écrans. L'eau et la vapeur sont séparées à l'aide d'un séparateur cyclone et le niveau d'eau dans le ballon reste constant pendant toute la durée du fonctionnement de la chaudière.

I.5.Economiseur

C'est un échangeur de chaleur dont le type de tuyauterie est en forme de serpentin, il se trouve en fin de parcours des gaz de combustion et a pour rôle la récupération d'une partie des calories restante dans les gaz de combustion, pour élever la température de l'eau d'alimentation et ainsi diminuer la quantité de chaleur nécessaire à la vaporisation de l'eau dans les faisceaux des tubes écrans. L'économiseur joue un rôle très important au moment du démarrage de la chaudière et ceci grâce à sa grande surface de chauffe et à son coefficient de transfert thermique car il sert de séparateur entre l'eau chaude se trouvant dans la bache alimentaire et l'écran vaporisateur froid. L'échange de chaleur au niveau de l'économiseur se fait par convection.

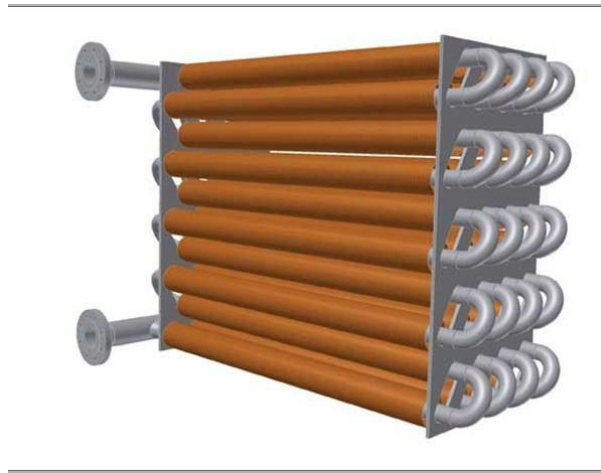


Figure I.10 :Economiseur [2]

I.6. Colonnes de descente et écrans vaporisateurs

Les colonnes de descente sont raccordées à la partie inférieure du ballon et conduisent l'eau qui tombe grâce à son propre poids à la partie inférieure de l'écran vaporisateur. Les écrans vaporisateurs revêtent toutes les faces du foyer de la chaudière. Ils sont constitués de tubes soudés soumis au rayonnement de la flamme.

L'eau se trouvant dans l'écran vaporisateur va être chauffée et va se vaporiser en partie sous forme de bulles. Ce mélange eau-vapeur ayant un poids spécifique plus faible va être poussé vers le haut par celle-ci. Ainsi le mélange revient au ballon venant cette fois-ci des collecteurs supérieurs des écrans vaporisateurs. Les écrans vaporisateurs sont soudés et étanche aux gaz et forment la seconde plus grande surface de chauffe après l'économiseur.

I.7. Les tubes écrans

La chambre de combustion est couverte de tubes écrans, protégés par des briques réfractaires. Ces tubes sont constamment alimentés en eau et reçoivent de l'énergie calorifique par rayonnement et par convection. L'émulsion eau/vapeur d'eau commence à se former au sein des tubes écrans avant d'atteindre le ballon. [4]

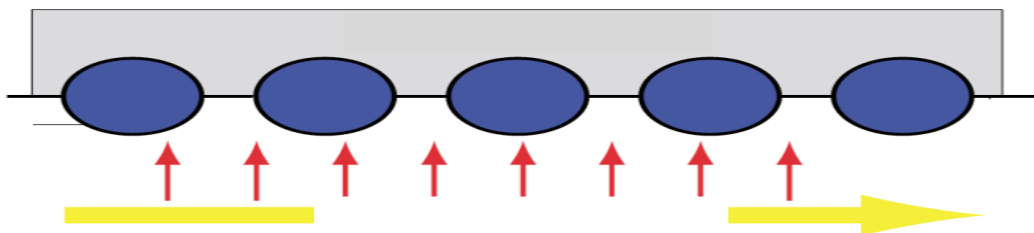


Figure I.11 :Transfert de la chaleur par radiation dans la chambre de combustion de la chaudière. [4]

I.8. Les échangeurs de chaleur

Ils sont utilisés principalement pour transférer l'énergie contenue dans les gaz de combustion à la vapeur ou à l'eau. Ils sont constitués d'une multitude de tubes regroupés en panneaux ou éléments qui sont dans le même plan, parallèles au sens de parcours des fumées et équidistants entre eux d'un pas transversal (ST) (figure12). Dans un même élément, les tubes sont perpendiculaires au trajet des fumées, distants entre eux d'un pas longitudinal (SL), plus ou moins nombreux, alimentés en parallèle par le même collecteur d'entrée et débitant dans le même collecteur de sortie. [2]

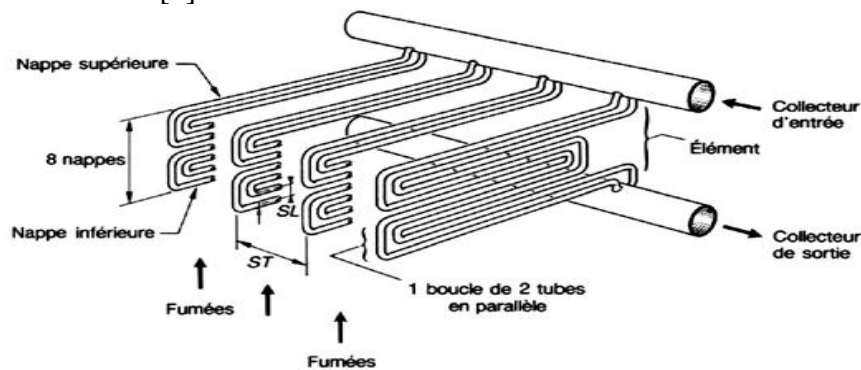


Figure I.12: Echangeur de chaleur. [2]

I.9. Surchauffeurs

Ils servent à resurchauffer la vapeur à partir de la vapeur saturée, ils sont montés en ligne séparées parallèles. La vapeur provient du ballon et passe par le collecteur de tube-support inférieur pour ensuite arriver dans le premier surchauffeur raccordé en contrecourant des gaz de combustion puis passe par le désurchauffeur avant d'arriver dans le deuxième surchauffeur et enfin par le surchauffeur final après passage par le deuxième désurchauffeur. L'échange se fait ici par convection.

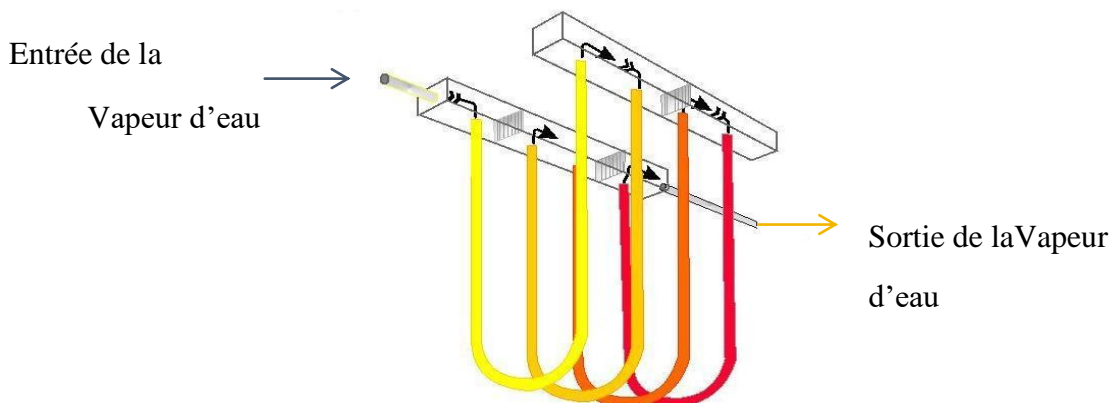


Figure I.13 :Schéma de principe de fonctionnement d'un surchauffeur. [4]

I.10. Resurchauffeurs

La vapeur est amenée dans la conduite de vapeur à resurchauffer après sa sortie du corps HP de la turbine où elle a subi une première détente puis, elle passe par deux désurchauffeurs qui sont alimentés par l'eau d'alimentation afin de stabiliser la température de sortie, ensuite elle est envoyée dans la partie MP de la turbine où elle s'achève de se détendre.

I.11. Chambre de combustion

Le générateur de vapeur est composé de brûleurs à gaz naturel répartis en niveaux. Les brûleurs sont insérés dans les caissons d'admission d'air au foyer.

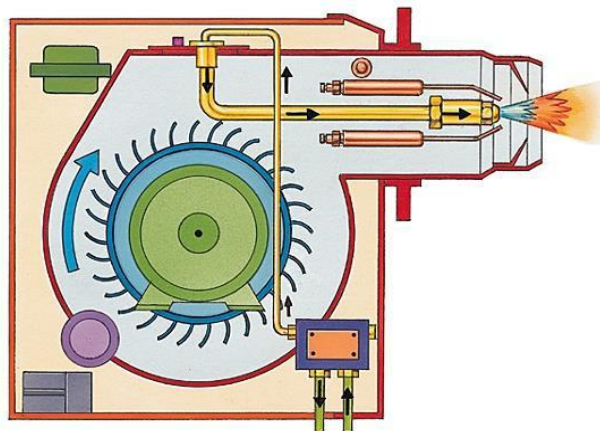


Figure I.14 : Brûleurs dans la chambre de combustion. [4]

I.12. Circuit d'air et de fumées

I.12.1. Ventilateurs de soufflage

L'air nécessaire à la combustion dans la chaudière est fourni par deux ventilateurs de soufflage qui refoulent l'air de combustion dans le réchauffeur d'air rotatif. Au refoulement des ventilateurs de soufflage, un piquage est prévu afin d'alimenter les deux ventilateurs de recyclage ainsi que le circuit d'air d'allumage de refroidissement en cas de défaillance des ventilateurs d'air de refroidissement. Les ventilateurs sont à simple flux et du type radial, et ils sont entraînés par un moteur asynchrone à vitesse constante. Des silencieux sont installés dans les conduites d'aspiration des ventilateurs.

I.12.2. Réchauffeur d'air rotatif

Il sert à réchauffer l'air de combustion qui arrive dans chaque brûleur en récupérant la chaleur dégagée par les fumées. Il est constitué d'un rotor tournant dans un boîtier autour d'un axe vertical, à l'intérieur de ce boîtier sont disposées trois couches de tôle de chauffe qui sont

traversées alternativement par les gaz de fumées et par l'air à contre-courant. Les tôles absorbent la chaleur dégagée par les fumées et la transmettent ensuite à l'air, ce qui induit une élévation de la température d'environ 16°C.

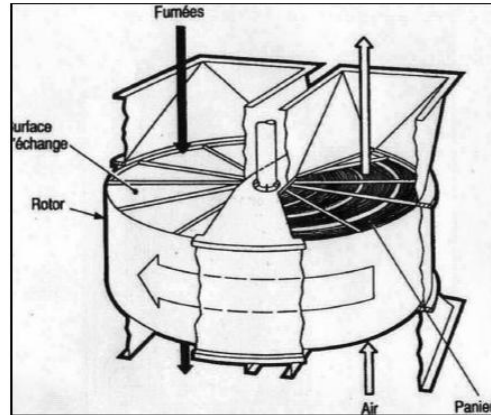


Figure I.15: réchauffeur d'air rotatif. [4]

I.12.3. Ventilateurs de recyclage

Ils ont pour rôle de recycler une partie des fumées issues de la combustion et ce afin de régler la température à la sortie du réchauffeur. Deux ventilateurs sont prévus par générateur de vapeur. La plus grande partie de la chaleur est transmise par les fumées produites lors de la combustion aux surfaces chauffantes. Les fumées sont amenées par une gaine au niveau du réchauffeur d'air rotatif où elles sont refroidies puis évacuées vers l'atmosphère à travers la cheminée.

II.13. Cheminée

La chaudière est équipée d'une cheminée d'une hauteur de 60 mètres, elle est de construction métallique et est équipée :

- D'une passerelle d'entretien.
- D'une protection par parafoudre.

I.14. Mode de fonctionnement du générateur de vapeur de la centrale de Jijel

Après sa sortie des réchauffeurs haute pression l'eau d'alimentation est dirigée vers l'économiseur la température de l'eau augmente grâce au contact avec les fumées dégagées lors de la combustion.

À la sortie de l'économiseur l'eau qui est encore à l'état liquide est conduite vers le ballon, ensuite elle descend vers les écrans vaporisateurs qui sont en contact avec la flamme des brûleurs ce qui augmente la température de l'eau qui se transforme ici en vapeur.

La vapeur monte naturellement jusqu'au ballon où elle est séparée de l'eau par un séparateur, puis elle est transmise aux surchauffeurs par le biais des tubes supports. À la sortie du surchauffeur finale, la vapeur est conduite vers la partie haute pression de la turbine où elle subit une détente. Une fois détendue et refroidie la vapeur est ramenée à la chaudière pour une resurchauffe. À la sortie du resurchauffeur, la vapeur poursuit sa détente dans le corps moyenne pression puis dans le corps basse pression. La vapeur ainsi détendue est conduite au condenseur.

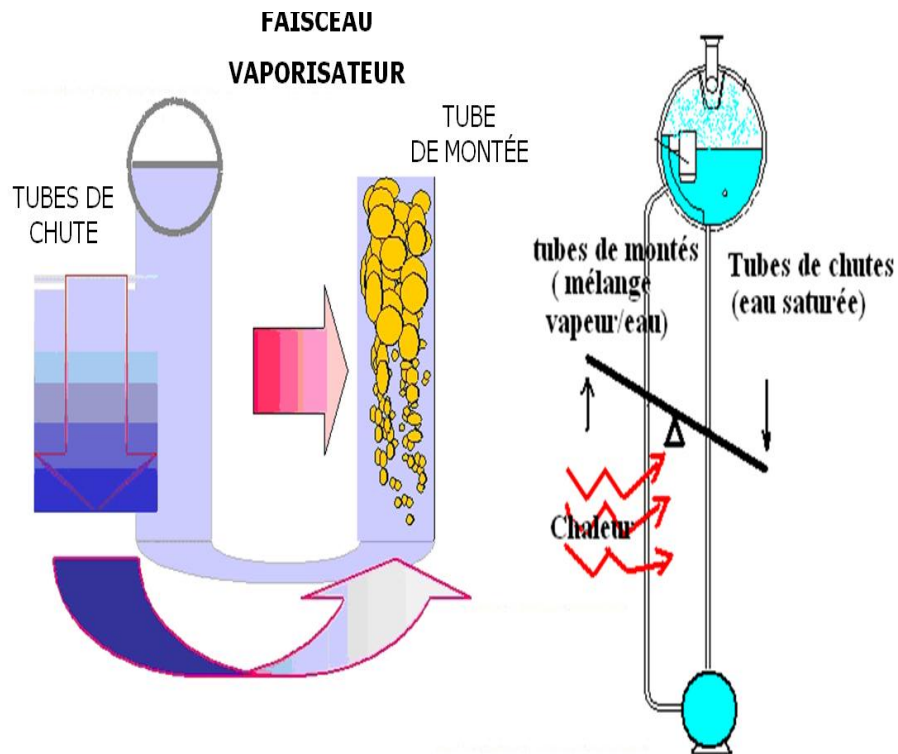


Figure I.16 :Principe de fonctionnement de la chaudière. [4]

La chambre de combustion est la partie principale du générateur de vapeur, c'est dans l'enceinte qu'elle constitue que se développe la flamme de combustion et qu'ont lieu les principaux échanges de chaleur qui sont utilisés pour produire de la vapeur. Ces échanges de chaleur s'effectuent par rayonnement. Les murs latéraux et le plafond de cette chambre sont tapissés. L'échange thermique se fait par rayonnement, dans les tubes en acier appelés « tubes écrans ». La sortie du gaz chaud (fumées) se fait généralement à travers une partie de la paroi latérale.

La chaleur introduite dans la chambre de combustion (figure) se divise en :

- Chaleur transférée au fluide directement par les parois
- Chaleur évacuée par les fumées à la sortie du foyer

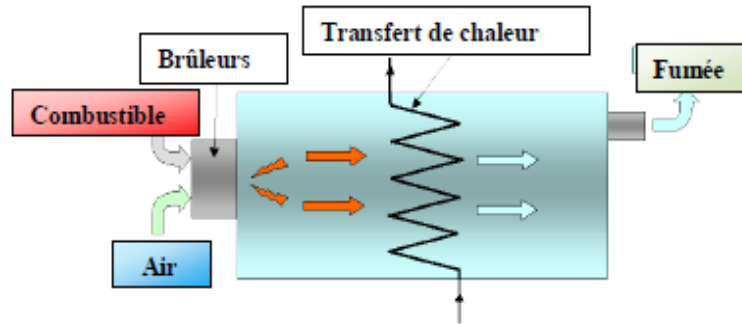


Figure I.17 : Bilan thermique dans la chambre de combustion. [4]

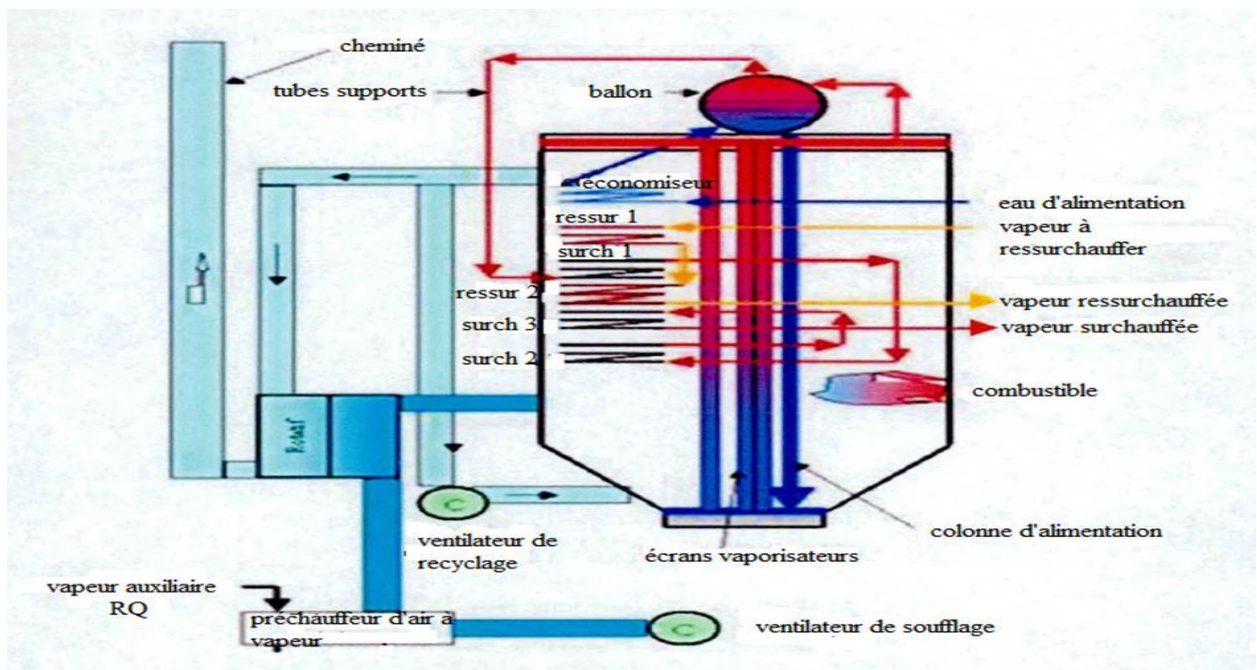


Figure I.18 : Schémas de chaudière à tube d'eau. [4]

Le transfert de chaleur entre la paroi des tubes et les gaz de combustion se fait généralement par deux modes, radiatif et convectif, dans les générateurs de vapeur radiants, comme le nom l'indique, il reçoit la quasi-totalité de la chaleur par radiation, la convection et la conduction ne représentent que 5%

La chaleur reçue par les murs d'eau est menée à travers les membranes et les parois des tubes, et transféré par convection forcée en ébullition nucléée au mélange eau/vapeur dans les tubes vaporisateurs.

I.15. Les problèmes dans la chaudière

Dans la chaudière, plusieurs problèmes peuvent survenir durant son service, du fait qu'elle travaille dans des conditions sévères, haute température (1300°C), haute pression (140 bars), environnement corrosif et fonctionnement continu (parfois des jours sans arrêt). Ces problèmes

ont une influence sur le bon fonctionnement de la chaudière, et parfois des conséquences graves, telles que des explosions. Généralement, les explosions des générateurs de vapeur sont de deux sortes :

- Explosion des parties sous pression (côté eau).
- Explosion de la chambre de combustion (côté feu).



Figure I.19 :Incidents sur les chaudières. [4]

I.15.1.Manque d'eau

Pour une chaudière, le manque d'eau est sans doute l'incident le plus sérieux qui puisse survenir, car, le niveau d'eau dans le ballon diminue rapidement et les parois des tubes sont surchauffées. Cet incident peut être provoqué par un mauvais fonctionnement de l'alimentation, causé par la défaillance d'une pompe d'eau alimentaire, la carence de la commande automatique, ou par une rupture dans un tube, etc. Cet accident menace l'intégrité structurale du système et provoque l'explosion des parties sous pression du générateur de vapeur.

Le but de la mise en commande de l'alimentation et de la réduction graduelle du débit d'eau est d'éviter de baigner brutalement certaines parties sous pressions où le métal aurait pu être surchauffé.

- À faible débit et feux stoppés, le niveau doit se refaire très lentement. Il faut donc suivre la montée pour la mise à niveau normale, puis fermer l'alimentation pour contrôler la tenue de ce niveau. S'il se maintient (preuve que la chaudière n'a pas soufferte), l'unité pourra être normalement remise à feu.

- Si le niveau ne se maintient pas, il faut réduire la pression de la vapeur graduellement en ouvrant la purge à la sortie de la surchauffeur. La chaudière se refroidit peu à peu, et le débit d'air est réduit. Dès que la chaudière est refroidie et sa pression abaissée à la pression atmosphérique, le ventilateur sera arrêté.
- Ne jamais vider la chaudière jusqu'à ce que le foyer soit assez froid. Avant la vidange de la chaudière, examiner l'unité pour y déceler les effets possibles d'une surchauffe localisée tels que fuites ou déformation de certaines parties sous pression.

I.15.2.Rupture des tubes

Plusieurs paramètres peuvent produire une rupture dans les tubes vaporisateurs, on peut citer la défaillance ou la corrosion des tubes. Quand l'incident se produit, le ballon supérieur (réservoir) se vide rapidement. L'eau d'alimentation qui entre dans le réservoir vient directement en contact avec les parois du ballon, ce qui entraîne des tensions dangereuses du fait de la grande différence de température entre l'eau d'alimentation et celle des tôles.

I.15.3.Mauvaise combustion

Si la combustion est élevée plus que la moyenne de fonctionnement, le niveau d'eau diminue rapidement dans la chaudière et la pompe d'alimentation travaille beaucoup ce qui peut causer sa surchauffe et par la suite son endommagement.

I.16.Le système de régulation dans la chaudière

Le bon fonctionnement et la prévention des installations industrielles reposent incontestablement sur la régulation. Ainsi pour maintenir la stabilité d'un système énergétique, il est nécessaire de recourir à une chaîne de régulation automatique dont la fonction principale est d'assurer le suivi, la surveillance et maîtrise de l'équipement. La régulation des chaudières présente, par rapport à celle d'autres systèmes industriels, des caractères particuliers résultant du fait que ces systèmes doivent faire face à des variations de charge incessantes, rapides et parfois importantes.

En effet, les chaudières sont systématiquement suivies d'utilisateurs de vapeur qui représentent des grandeurs perturbatrices extrêmement variables. Il en résulte que cette régulation est placée sous le signe de la vitesse de réponse dynamique. Les chaînes de régulation, les appareils de mesure, les servomoteurs eux même, agissant sur les organes de réglage, doivent être établis pour tenir compte de cette condition.

Cette surveillance s'effectue par l'acquisition des mesures sur le site et la transmission de celles-ci jusqu'à la salle de contrôle où elles seront visualisées par l'opérateur. La qualité de la

mesure dépend de celle du capteur-transmetteur. Les capteurs doivent être régulièrement étalonnés. Il faut veiller que l'information fournie correspond à la mesure effectuée, cette vérification est d'autant plus fréquente que la mesure (température, débit et niveau) est sensible pour la qualité de la production ou la sécurité de l'installation. Le choix du type de chaîne de régulation dépend des variations de charge (importantes et rapides) auxquelles sont soumis ces systèmes.

Pour le générateur de vapeur, la perturbation essentielle a pour origine la demande de vapeur de la turbine. En effet, toute variation de charge du groupe turbo-alternateur provoque par action sur la régulation de la turbine (variation de vitesse), une variation de l'ouverture des soupapes de réglage, donc du débit de vapeur demandé au générateur. Il en résultera pour celui-ci un déséquilibre entre les calories entrant sous forme de combustible et les calories sortant sous forme de vapeur. Ce déséquilibre, dès le début de la perturbation, affectera les facteurs à régler, lesquels régiront d'ailleurs les uns sur les autres. Les facteurs à régler sont les facteurs qui doivent être maintenus à des valeurs déterminées pour que le fonctionnement du générateur de vapeur soit correct. On distingue :

- La pression vapeur à la sortie du générateur.
- L'excès d'air ou le rapport « air-combustible ».
- La température de la vapeur surchauffée.
- La température de la vapeur resurchauffée.
- Le niveau du réservoir (éventuellement pour les générateurs à circulation naturelle).
- La dépression dans la chambre de combustion (éventuellement).

I.17. Performances attendues et conditions générales d'utilisation

I.17.1 Caractéristiques liées à la conception

Les performances intervenant dans le choix de l'architecture d'une chaudière sont principalement :

- La plage de fonctionnement pour laquelle on désire maintenir constantes les températures de vapeur surchauffée et resurchauffée ;
- Le seuil au-dessus duquel le fonctionnement est assuré par une régulation automatique ;
- Le seuil au-dessus duquel la marche est assurée par un seul combustible, sans soutien d'un combustible auxiliaire (ce seuil est souvent appelé *minimum technique*) ;
- La rapidité de variation de charge ;
- Le temps de démarrage, de montée en température, en pression et en puissance ;
- L'allure de rendement optimal ;
- L'allure de pointe et éventuellement les conditions de marche en surcharge et en surpression ;
- Le coût de l'énergie auxiliaire, soit sous forme de vapeur basse pression, soit sous forme d'énergie électrique ; les conditions extrêmes d'utilisation telles que températures minimales en hiver, maximales en été, humidité, pluviométrie ;
- L'environnement et en particulier les limitations de pollution et de bruit ;
- Les conditions sismiques.

On peut demander à une chaudière de fonctionner selon le cycle de production d'énergie dans lequel elle se trouve intégrée, ou selon l'utilisation de la vapeur produite:

- En permanence à son allure maximale ;
- En production de base ;
- Au fil d'un combustible de récupération ;
- En production adaptée à la demande d'un réseau, avec par exemple arrêts toutes les fins de semaine;
- En production de pointe uniquement, avec possibilité de prise de charge rapide. Ce premier type d'exigence influe directement sur la conception, en particulier sur le choix :
 - Du mode de circulation (lié à l'inertie thermique) ;
 - Du rendement (en relation avec l'investissement et l'amortissement sur la période prévue de fonctionnement) ;
 - De certaines caractéristiques constructives (contraintes thermiques en variation de charge). Il est fréquent que le consultant, connaissant les problèmes liés à

l'utilisation désirée, définisse certains impératifs, à commencer par le mode de circulation. [5]

I.17.2. Caractéristiques de l'eau et de la vapeur

En premier lieu, ce sont les valeurs des débits, pression et température de l'eau et de la vapeur qui définissent la marche maximale continue, c'est-à-dire celles de :

- L'eau d'alimentation, généralement à l'entrée de l'économiseur;
- La vapeur surchauffée, à la sortie du surchauffeur haute température ;
- La vapeur à resurchauffer, à l'entrée du resurchauffeur basse température, il est imposé une valeur maximale admissible de la perte de charge dans les resurchauffeurs ;
- La vapeur resurchauffée (cycle d'une ou deux resurchauffes), à la sortie du resurchauffeur haute température.[5]

I.17.3. Caractéristiques du combustible

Il est bien évident qu'une chaudière ne peut pas brûler indifféremment n'importe quel type de combustible et cela d'autant moins que, dans les constructions modernes, la combustion se passe dans un foyer dont les parois sont constituées d'écrans tubés à 95 ou 100 %.

Suivant le combustible employé (gaz, fuel, charbon, lignite, gaz de haut-fourneau, etc.), certaines propriétés ont une influence sur la conception de la chaudière, principalement sur celle des brûleurs, du foyer et des trémies de cendrier, mais également sur les échangeurs installés sur le trajet des fumées.

- Pouvoir calorifique
- Teneur en cendres et leur
- Humidité du combustible
- Teneur en matières volatiles
- Composition chimique [5]

I.18. Rendement nominal ou rendement utile

Le rendement utile η_{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

$$\eta_{\text{utile}} = \frac{P_u}{P_a} \text{ (I.1)}$$

Avec :

- P_a = puissance contenue dans le combustible = débit de combustible \times son pouvoir calorifique PCI (ou PCS)
- P_u = puissance utile de la chaudière ou puissance fournie à l'eau de chauffage

Il s'agit d'un rendement instantané qui peut varier en fonction des conditions d'exploitation de la chaudière (température de l'eau, puissance du brûleur par rapport à la puissance de la chaudière). La différence entre la puissance utile fournie à l'eau (P_u) et la puissance contenue dans le combustible est constituée de pertes :

- Vers la cheminée : Les fumées de combustion sont évacuées encore chaudes. Cette chaleur est perdue.
- Vers la chaufferie : La chaudière est comme un gros radiateur qui émet de la chaleur vers l'ambiance de la chaufferie.

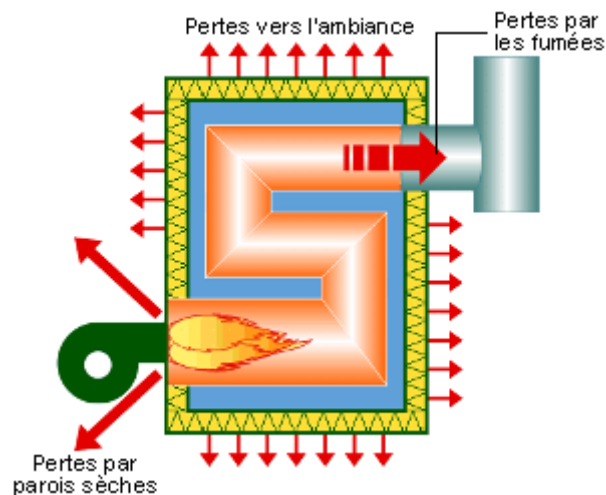


Figure I.20: Pertes d'une chaudière lorsque son brûleur est en fonctionnement. [5]

Le rendement utile d'une chaudière peut donc s'exprimer sous la forme:

$$\eta_{\text{utile}} = \frac{P_a - \text{Pertes fumées} - \text{Pertes ambiance}}{P_a} \quad (\text{I.2})$$

En pratique, on utilise souvent la forme :

$$\eta_{\text{utile}} = \eta_{\text{comb}} - q_r \quad (\text{I.3})$$

Avec :

- η_{comb} = rendement de combustion [%].
- q_r = pourcentage de réduction due aux pertes vers l'ambiance durant le fonctionnement du brûleur [%].

Le rendement de combustion se définit comme :

$$\eta_{\text{comb}} = \frac{Pa - \text{Pertes fumées}}{Pa} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

- $Pa = \text{puissance contenue dans le combustible} = \text{débit de combustible} \times \text{PCI (ou PCS)}$

Le rendement de combustion est le plus souvent calculé par rapport au pouvoir calorifique inférieur (PCI) du combustible. Il en résulte des rendements souvent supérieurs à 100 % pour les chaudières à condensation. Le rendement de combustion est l'image de la qualité de la combustion et de l'échange thermique entre les fumées et le fluide caloporteur. On relève les deux éléments clés :

- La température des fumées, plus celle-ci est élevée, plus il y a de perte de chaleur vers la cheminée, et moins bon est l'échange entre l'eau et les fumées.
- Le pourcentage de CO_2 contenu dans les fumées qui symbolise la transformation complète du combustible.

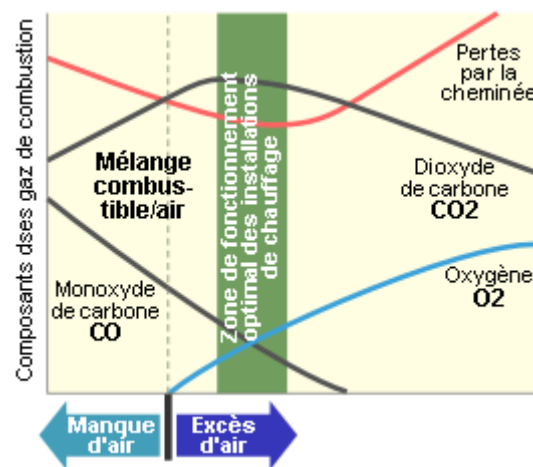


Figure I.21 : Evolution du contenu des fumées avec l'excès d'air [%] de combustion. [5]

I.19. Eau d'alimentation et eau d'appoint

Lorsque nous générons de la vapeur, l'eau s'évapore à l'intérieur de la chaudière et elle doit être remplacée par de l'eau d'alimentation poussée par une pompe. Lorsque la vapeur passe du réseau vapeur dans les différents systèmes d'échange thermique de l'installation. Elle change d'état et redevient eau chaude - condensat. A moins d'une contamination due au processus, ce

condensat est de l'eau chaude de bonne qualité qui est idéale pour l'eau d'alimentation de chaudière.

Il est donc économique de retourner le plus de condensats possible pour les réutiliser comme eau d'alimentation de chaudière. Il est impossible de retourner 100% du condensat (il y aura d'autres pertes d'eau comme la déconcentration) et de l'eau brute devra être introduite pour augmenter le retour de condensat. Cette eau brute qui doit être traitée chimiquement est alors appelée eau d'appoint.

I.20.Objectifs du traitement de l'eau

La pression et les caractéristiques de la chaudière définissent la qualité de l'eau qui est nécessaire à la production de vapeur. La séquence des traitements est fonction de l'espèce et de la concentration des éléments de contamination qui se trouvent dans l'eau d'appoint et de la qualité de l'eau traitée que l'on désire obtenir.

Les objectifs de bon fonctionnement des chaudières sont relativement simples à établir : longue durée de vie – Rendement maximum – fonctionnement sûr. Ce qui est réalisé pour traiter l'eau utilisée pour la production de vapeur permettra de déterminer si ces objectifs sont atteints. La qualité de l'eau doit être telle que nous fonctionnons suivant les critères suivants :

I.20.1.Absence de tartre

Si l'eau d'alimentation est dure et si elle n'est pas traitée par des moyens chimiques, les surfaces d'échange s'entartrent. Entraînant une réduction du transfert de chaleur et du rendement, les périodes d'entretien de la chaudière seront rapprochées.

Dans les cas extrêmes, des surchauffes locales se produiront entraînant une détérioration mécanique et même une destruction de la cuve. L'absence totale de tartre peut aussi entraîner l'apparition de mousses à l'intérieur de la cuve.

I.20.2.Absence de corrosion

Si l'eau contient des gaz dissous, en particulier l'oxygène, la corrosion des surfaces de la chaudière, des tuyauteries et des autres appareils peut se produire. Si elle est trop alcaline, elle peut créer d'autres problèmes tels que la mousse comme expliqué plus loin. L'eau d'alimentation des chaudières à vapeur doit avoir un pH compris entre 8,5 et 10,5. La fragilisation caustique peut provoquer des fendillements légers du métal, et doit être surveillée pour éviter une détérioration du métal. Le facteur principal est une haute concentration en soude caustique. Des chaudières mécano-soudées modernes sont moins sensibles sauf aux extrémités des tubes.

I.20.3.Vapeur de bonne qualité

Si les impuretés de l'eau d'alimentation de la chaudière ne sont pas correctement traitées, elles peuvent être entraînées dans le réseau vapeur. L'entraînement peut être provoqué par deux causes : le primage et la mousse. Le primage est l'éjection de l'eau de la chaudière au niveau du départ vapeur et résulte généralement de la façon dont la chaudière fonctionne

- 1- Fonctionnement de la chaudière avec un niveau d'eau trop élevé.
- 2- Fonctionnement de la chaudière en dessous de sa pression de calcul. Ce qui augmente le volume et la vitesse de la vapeur.
3. Demande excessive de vapeur.

La deuxième cause de l'entraînement est la mousse qui est due aux conditions chimiques de l'eau. Les bulles de vapeur restent petites, n'éclatent pas et sont entraînées dans le réseau vapeur. L'entraînement de solides dans le réseau vapeur peut provoquer des dépôts et développer la corrosion. Les vannes et les purgeurs de vapeur se bloquent.

I.20.4.Sécurité

Les dangers de surchauffe provoquée par le tartre et de corrosion provoquée par les gaz dissous sont faciles à comprendre.

La formation de mousse, de tartre et de boue peut mener à un fonctionnement incorrect des régulations de niveau dans les cas extrêmes.

I.20.5. Phénomènes liés à la qualité d'eau

Trois phénomènes indésirables liés à la qualité de l'eau sont redoutés dans les chaudières:

- Les dépôts :Les composés les plus courants que l'on retrouve dans les dépôts sont le phosphate de calcium, le carbonate de calcium et les divers oxydes de fer. Les dépôts forment une isolation sur le tube et réduisent par conséquent la diffusion de la chaleur donc le rendement de la chaudière. Des dépôts importants peuvent provoquer des surchauffes locales qui peuvent conduire à des percements voire des ruptures du tube.
- La corrosion :La corrosion de l'acier par l'eau neutre ou légèrement alcaline est lente.Si le pH de l'eau est légèrement acide, dû le plus souvent à la présence de gaz acide dissous, la corrosion est plus rapide. Elle est encore accélérée par la présence de traces d'oxygène. Elle peut avoir lieu dans le système d'approvisionnement d'eau, dans le générateur de vapeur et dans les tuyauteries de retour de condensats. La lutte contre la corrosion des circuits d'eau et de

vapeur, passera par l'élimination de l'oxygène par des moyens physiques ou chimiques. Un autre type de corrosion est dû à une attaque par des produits alcalins. Elle se produit dans certaines zones lorsqu'il y a concentrations caustiques due à la formation de bulles de vapeur (alternance vapeur / eau avec formation de dépôt des sels suite à l'évaporation, puis corrosion sous dépôt).

- Le primage : Le troisième problème important est l'entraînement de l'eau de la chaudière dans la phase vapeur. Cela peut être dû à :
 - Un effet mécanique : entraînement de l'eau par la vapeur
 - La volatilité de certains sels de l'eau de chaudière comme la silice ou les sels de sodium
 - La formation de mousse.

I.20.6. Origines et causes des phénomènes

La présence de dépôts sur les parois des tubes, une quantité d'amas de dépôt, accumulation des suies sur les parois externes du ballon inférieur peut causer des percements (fuite d'eau) des tubes. Ainsi ce qui conduit aux dégradations de matériau au niveau :

- Des parties inférieures cintrées des tubes du faisceau convection.
- Les tubes des surchauffeurs.
- La paroi externe du ballon inférieur.
- Les tubes et les ailettes de l'économiseur de la chaudière.
- Certaines parties du casing de la chaudière.

Le schéma suivant représente les différents éléments concernés par la dégradation

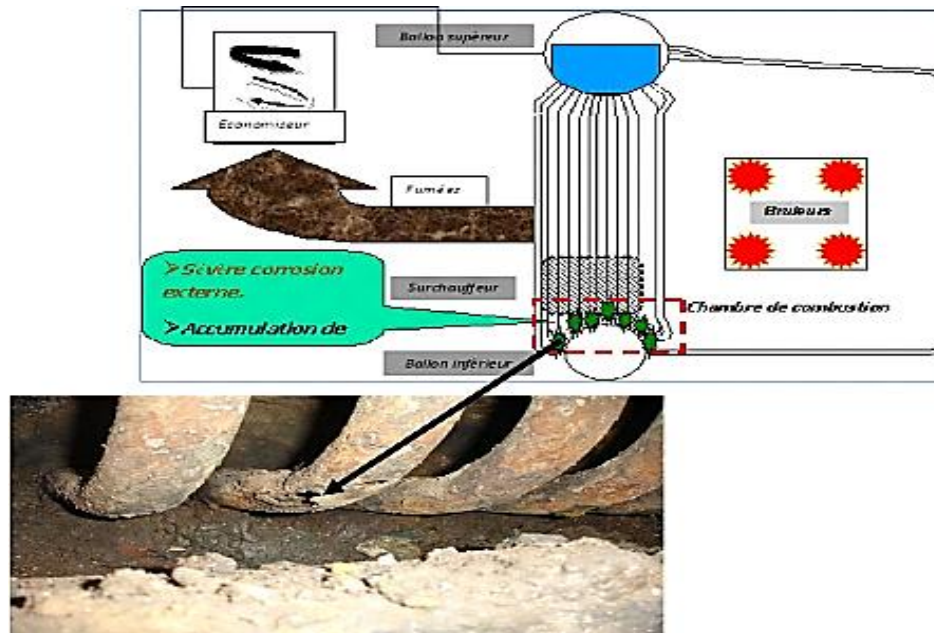


Figure I.22 : Dégradation des éléments concernés. [5]

D'après les analyses des incidents et des essais, on peut dire que presque la majorité des percements de ces tubes et la dégradation du rendement chaudière sont favorisés par :

- Accumulation de dépôt riche en composés soufrés à ces endroits, provenant de la combustion du fuel à teneur élevée en soufre. Tous les conditions favorables telles que la température, le taux d'oxygène et d'humidité, lors des arrêts, permettant la formation d'acide sulfurique, responsable de la corrosion.
- Défaillance et inefficacité du nettoyage chimique pour éliminer les dépôts persistants aux parties inférieures.
- Inefficacité du drainage et de neutralisation, lors des nettoyages chimiques, favorisant la rétention des produits corrosifs piégés entre les tubes et le réfractaire.
- Arrêts prolongés des chaudières à des températures inférieures au point de rosée eau/acide, ce qui accélère la corrosion.

Les produits dus à la réaction de combustion au niveau de la chaudière sont les principales causes de dégradations considérées.



Figure I.23 : dégâts des dépôts d'encrassement dans la surface d'échange. [5]

Lors des premières années d'exploitation, le dépôt est relativement mince. Il peut dans certains cas augmenter l'efficacité de l'échange thermique via par exemple l'augmentation de la surface d'échange induite par les dépôts (Figure I.23).

L'apparition de dépôts d'encrassement sur les surfaces d'échange du générateur de vapeur (Figure I.24) provient d'un mécanisme de corrosion qui conduit à la libération de particules de magnétite (Fe_3O_4) et d'espèces dissoutes dans l'écoulement [5]. Ces impuretés atteignent le générateur de vapeur et s'y accumulent car elles ne sont pas transportées par la phase vapeur.

Après plusieurs années d'exploitation, suivant le type de générateur de vapeur, des dépôts de dizaines, voire de centaines, de microns d'épaisseur recouvrent les tubes du générateur de vapeur de manière non nécessairement uniforme. Ces dépôts d'encrassement perturbent le transfert thermique.

Cependant, au fur et à mesure des années d'exploitation, le dépôt s'épaissit et dégrade progressivement le transfert thermique. Cette baisse d'efficacité se traduit par une diminution de la température du fluide secondaire et donc par une chute de la pression de saturation associée de la phase vapeur. Ces chutes de pression peuvent atteindre plusieurs bars, diminuant ainsi la puissance électrique produite par le groupe turbo-alternateur.



Figure I.24 : Dépôt d'encrassement dans la surface d'échange. [5]

I.21. Systèmes de purge de chaudières

Pour ne pas atteindre la saturation en sel dans une chaudière, les constructeurs prévoient un système de purge des eaux chargées. Il existe principalement deux types de purge des eaux de chaudière :

- **Chaudières à purge manuelle discontinue** : Pour les chaudières à purge manuelle discontinue il faut prévoir une vidange périodique de la chaudière, la fréquence de cette opération de purge doit être choisie de façon à ne pas atteindre la saturation en sel.
- **Chaudières à purge continue** : Pour les chaudières à purge continue il faut régler la vanne de purge de façon à ce que l'eau purgée à une concentration proche de la saturation. Un excès de purge entraîne une perte en eau traitée, adoucie ou même osmosée.

La salinité d'eau de purge provient d'un mélange de plusieurs sels, c'est difficile de savoir la conductivité de saturation.

I.22.Sources de dégradation du rendement énergétique d'une chaudière

I.22.1Perte dans le rendement de la combustion

Les analyses des gaz de combustion permettent de mesurer le rendement de la combustion dans une chaudière. Le rendement de combustion est calculé selon le type de combustible, la température ambiante, la température de fumée, la concentration en oxygène dans la fumée ou l'excès d'air.

Le rendement de combustion exprime la partie de la chaleur dégagée par la combustion et absorbée par l'eau de chaudière. Les pertes de combustion sont les calories ou joules qui partent avec la fumée, puisque la fumée part à une température supérieure à la température ambiante. On note que l'excès d'air est une source principale des pertes de combustion, puisqu'on fait entrer de l'air frais dans le foyer de la chaudière et on le fait sortir à la température de fumée.

Les pertes par les fumées proviennent :

- De la chaleur sensible contenue dans les fumées qui sont nettement plus chaudes que l'air aspiré dans la chaufferie.
- De la chaleur latente, si la vapeur d'eau contenue dans les fumées n'est pas entièrement condensée. Cette perte est prise en compte dans le rendement chiffré si on compare l'énergie fournie au Pouvoir Calorifique Supérieur.

- Des imbrûlés issus d'un mauvais mélange entre l'air et le combustible, provoquant la production de CO au lieu de CO₂ (la chaleur dégagée est alors inférieure à celle fournie par une combustion complète).[6]

I.22.2. Pertes vers l'ambiance

Les pertes vers l'ambiance proviennent de l'échange thermique par rayonnement et convection entre la chaudière et son environnement. Ces pertes proviennent d'une part de la masse d'eau chaude présente dans la chaudière et d'autre part des parties non irriguées de la chaudière qui s'échauffent directement sous le rayonnement de la flamme. On parle dans ce dernier cas de pertes par parois sèches.

Les pertes par l'ambiance sont fonction notamment de la température moyenne de l'eau dans la chaudière, de la configuration de cette dernière et de son degré d'isolation (attention aux surfaces non isolées telles que les portes ou le socle). Elles sont donc en partie dépendantes de la vétusté de la chaudière et de sa régulation.[6]

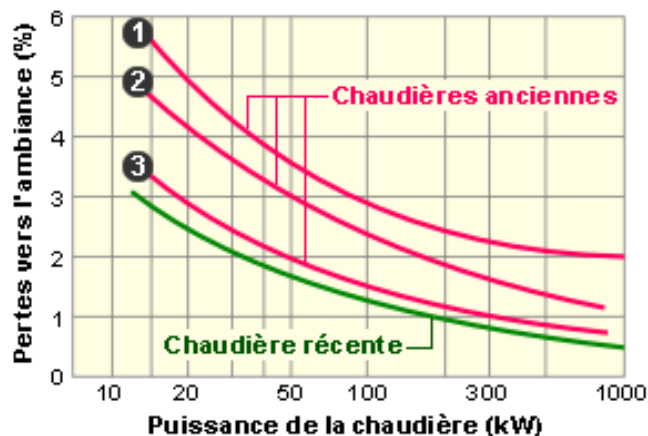


Figure I.25 : variation des pertes vers l'ambiance en fonction de la puissance. [6]

1. Chaudière au charbon convertie au fuel.
2. Chaudière gaz atmosphérique.
3. Chaudière fuel ou gaz à brûleur pulsé.

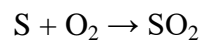
Pertes vers l'ambiance totales (pertes par parois sèches + pertes par parois irriguées) des anciennes chaudières lorsque le brûleur est en action, en pourcentage de la puissance de la chaudière.

I.22.3. Pertes par formation du SO₃

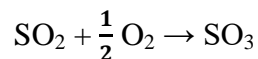
Les difficultés d'exploitation par encrassement et corrosion à haute et basse température ont pour origine la formation de SO₃ à partir du soufre contenu dans le combustible. En brûlant, le soufre du combustible (fuel lourd) donne naissance à de l'anhydride sulfureux (SO₂).

Mis en présence de l'oxygène de l'air en excès, dans le cas de combustion oxydante ou oxydo-réductrice, et de catalyseurs de conversion tels que le vanadium, le fer ou le nickel, une partie du SO₂ formé se transforme en anhydride sulfurique (SO₃). Dans certaines conditions de température de peau du métal et d'hygrométrie, le SO₃ se condense et forme de l'acide sulfurique (H₂SO₄).[7]

La combustion du S donne :



La présence d'excès d'air donne ensuite l'équilibre :



I.22.4. Pertes par formation de l'acide sulfurique

L'acide sulfurique prend naissance à partir de SO₃ et de la vapeur d'eau produite par la combustion du fuel. Le mélange "eau-acide" se condense sur les parties froides dès que la température atteint le point de rosée acide entre 100° et 150°C.

Aux moments des arrêts des chaudières la température peut atteindre des valeurs très inférieures à 100°C. Donc la formation de H₂SO₄ liquide et l'ionisation par l'eau (humidité) est fortement probable.[7]

L'économiseur est un échangeur de chaleur à circulation d'eau inverse par rapport à celle des gaz de combustion. L'échange de la chaleur se réalise par convection. L'économiseur est généralement placé avant le réchauffeur d'air, dans le circuit des fumées.



a) Propre

b) Encrassé

Figure I.26 :Economiseur en bon état et Economiseur encrassé. [7]

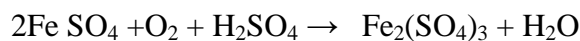
D'après le suivi de la température de l'eau d'entrée économiseur pour les quatre chaudières on remarque que la température d'eau est très faible ce qui veut dire qu'il y a une forte condensation des fumées à ce niveau. La cause principale de cette chute de Température est due à l'état de dégazeur (partie de dégazage physique, le matériau des chicanes dégradé).

L'attaque de H_2SO_4 a le mécanisme suivant :

1 -- En se condensant l'acide sulfurique attaque l'acier :



2 - En présence d'oxygène une autre réaction se poursuit :



3 -- Le sulfate ferrique formé peut réagir sur le fer pour revenir à l'état ferreux :



I.22.5.Perte énergétique avec les purges de déconcentration

On rappelle que les purges de déconcentration d'une chaudière permettent de maintenir une concentration de sels totaux inférieure au seuil de saturation, pour éviter la cristallisation des sels sur les tubes de la chaudière.

Les vapeurs sont supposés exempts de sel. Pour un calcul rapide, on estime que la conductivité d'eau est proportionnelle à la salinité pour un même mélange de sels. Toute la masse des sels qui entre avec l'eau d'alimentation de chaudière sort avec les eaux de purge (conservation de masse)

$$Q_{\text{purge}} = \frac{Q_{\text{vapeur}} \times C_{\text{alim}}}{(C_{\text{alim}} + C_{\text{purge}})} \quad (\text{I.5})$$

Avec :

- Q_{purge} : Débit d'eau de purge
- Q_{vapeur} : Débit de vapeur
- C_{purge} : Concentration en sel eau de purge
- C_{alim} : concentration en sel eau d'alimentation

I.22.6. Pertes énergétiques avec les eaux de purge d'une chaudière

Selon la pression de vapeur il faut calculer la température d'eau de purge, cette température est la même que celle de vapeur (voir tableau ou diagramme d'eau et vapeur saturée). Pour cette même eau on calcule son enthalpie (voir diagramme d'eau saturée) Les pertes énergétiques par l'eau de purge = Débit d'eau de purge \times enthalpie d'eau de purge. [6]

I.22.7. Pertes d'énergie du système de distribution

Dans les systèmes à vapeur, les purgeurs de vapeur peuvent tomber en panne en moyenne jusqu'à 25 % du temps. Les fuites de vapeur des raccords de tuyaux, des robinets et des purgeurs peuvent provoquer des pertes d'énergie importantes. De plus, l'eau qui fuit doit être remplacée, traitée chimiquement et chauffée. Il s'agit là de conséquences moins évidentes, mais pourtant coûteuses. Les systèmes au fluide chauffant peuvent également être sujets à ce problème.

S'assurer que la dimension de la tuyauterie est adéquate car des tuyaux surdimensionnés peuvent entraîner une augmentation des coûts du capital, de l'entretien et de l'isolation, ainsi que des pertes de chaleur en surface. Par contre, les tuyaux de dimensions insuffisantes exigent une pression plus élevée et une énergie de pompage supplémentaire. De plus, ils présentent des taux de fuite plus importants.

Une tuyauterie désuète et en surnombre entraîne un gaspillage d'énergie. Comme la tuyauterie est maintenue à la même température que le reste du système, la perte de chaleur par unité de longueur de tuyau reste la même. Les pertes thermiques engendrées par la tuyauterie en surnombre augmentent la charge calorifique des locaux et par conséquent, les besoins en ventilation et en climatisation. En outre, la tuyauterie en surnombre est peu entretenue et contrôlée, ce qui engendre des pertes supplémentaires.[6]

I.23. Influence de la température de fumées sur le rendement de la chaudière

Un bon rendement signifie que la quantité d'énergie consommée par la chaudière, est utilisée de façon optimale. Il est obtenu grâce à une isolation renforcée des parois de la chaudière qui limite les déperditions thermiques. Le brûleur est aussi mieux réglé pour optimiser l'énergie de la combustion.

Cette solution consiste à un préchauffage de l'eau à l'entrée économiseur avec une partie de l'eau chaude sortie économiseur à condition que le nettoyage se fait auparavant.

- Le principe est le suivant : une partie de l'eau chaude 60% sortant de l'économiseur est recyclée pour être utilisée dans le préchauffage de l'eau sortant du dégazeur et entrant à l'économiseur, les 40% (220°C) restent au niveau de la conduite d'alimentation du ballon supérieur avant d'être mélangé avec l'eau qui sort de l'échangeur à une température de 155 °C. Le mélange (182°C) alimente directement la chaudière.

Pour appliquer cette solution, le nettoyage de l'économiseur auparavant est une condition nécessaire qui doit être satisfaite, cela permet de bien récupérer les calories des fumées pour le chauffage de l'eau avant sortie économiseur et pour arriver aux températures citées ci-dessus. Autrement dit en gardant la température d'entrée économiseur à 150°C, c'est à dire supérieure au point de rosé des fumées avec le bon fonctionnement du système de ramonage, l'encrassement de l'économiseur est réduit pour une longue durée.

I.24. Influence des gaz dissous de la qualité de l'eau d'alimentation sur la vapeur

Il s'agit principalement de l'oxygène et du dioxyde de carbone et leur présence dans la chaudière et l'installation provoque la corrosion. Il est nécessaire de les ôter et/ou de les neutraliser pour éviter les détériorations. Le dioxyde de carbone dissous sous la forme d'acide carbonique est souvent présent dans l'eau d'alimentation et il diminue le niveau de pH.

Une régulation correcte du pH corrigera cette diminution mais le dioxyde de carbone est également dégagé dans les chaudières par le chauffage et d'autres réactions chimiques et il peut être nécessaire de choisir l'utilisation d'un inhibiteur de corrosion pour éviter l'attaque corrosive du système de condensat.

Cependant, le gaz dissous le plus nuisible se révèle être l'oxygène qui peut provoquer aussi la corrosion du métal. De très faibles quantités d'oxygène peuvent provoquer des détériorations importantes. Mais elles peuvent être évacuées mécaniquement et chimiquement.

La quantité d'oxygène dissous est très dépendante de la température de l'eau d'alimentation. Plus la température de l'eau d'alimentation est basse plus le volume d'oxygène dissous est important.

Donc l'oxygène de l'eau d'alimentation peut être évacué en chauffant l'eau d'alimentation et en maintenant la température élevée. Cela peut être fait de nombreuses façons impliquant l'utilisation de dégazeurs sous pression atmosphériques ou sous vide.

Tout oxygène restant est alors traité par l'addition d'un absorbant chimique d'oxygène tel que le sulfite de sodium catalysé. L'addition de ce dernier contribuera à l'augmentation du TDS de l'eau de chaudière.

- L'eau : La présence d'un système de traitement d'eau anti-tarte est essentiel et le contrôle régulier du TH, PH et des TDS. [8]

I.25. Amélioration du rendement de la chaudière

I.25.1 Maximiser le retour du condensat chaud

Le système à vapeur et à condensat doit être conçu de sorte que l'on puisse éliminer le coup de bélier et réduire les pertes et l'entretien. Si une chaudière à vapeur subit une perte de condensat, on constate que la consommation d'eau est plus élevée, l'utilisation de produits chimiques de traitement de l'eau est plus fréquente et la production d'énergie thermique nécessaire pour chauffer l'eau d'appoint est accrue.

Quand il y a retour du condensat, c'est-à-dire lorsque la pression du procédé est relâchée dans le réservoir de retour du condensat, de l'énergie supplémentaire est perdue sous forme de vapeur de détente. On peut minimiser de telles pertes, par exemple en immergeant l'entrée de retour du condensat dans le réservoir ou en installant un condenseur de buées à arrosage sur le dessus du réservoir.[8]

Un **système à circuit fermé** fournissant un condensat de vapeur sous pression à rebouillir permet presque d'éliminer les pertes et requiert moins d'équipement de traitement de la vapeur.

I.25.2. Récupération des pertes de chaleur de la chaudière

a) Gaz de carneau :

Il s'agit de la meilleure occasion de récupération de chaleur dans le générateur de vapeur. Même avec des brûleurs bien réglés fournissant des températures minimales de gaz de carneau, tout en réalisant une consommation complète du combustible. Il est encore possible de récupérer une partie de cette chaleur qui sinon « s'échapperait par la cheminée ». Les échangeurs de

chaleur peuvent être utilisés pour préchauffer l'eau d'alimentation de la chaudière (économiseurs) ou l'air comburant (réchauffeurs). En général, les économiseurs permettent une amélioration de 3 à 4 % de l'efficacité globale de la chaudière.

Les concepteurs et les opérateurs d'économiseurs doivent prendre en considération les problèmes de corrosion éventuels, en particulier dans les combustibles contenant du soufre. L'humidité contenant de l'acide sulfurique corrosif risque de se condenser sur toutes les surfaces des échangeurs de chaleur dont la température descend sous le point de rosée acide.

Chaque chaudière a une limite particulière de basse température de gaz de carneau qu'il faut déterminer individuellement si l'on envisage un échange de chaleur complémentaire. Comme les températures des gaz de carneau sont plus basses à des charges faibles, les économiseurs sont souvent équipés d'un dispositif de contrôle de dérivation permettant de maintenir ces températures au-dessus d'un minimum préétabli.

b) Les économiseurs à condensation :

Ils permettent d'améliorer l'efficacité de la récupération de la chaleur des gaz de carneau en refroidissant ces gaz à une température sous le point de rosée acide. Ils permettent ainsi de récupérer tant la chaleur sensible provenant des gaz de carneau que la chaleur latente de l'humidité qui condense. Il peut y avoir de l'humidité dans le combustible, mais la plus grande partie se forme par combustion de l'élément d'hydrogène du combustible. Comme la condensation est inévitable, le système d'échange de chaleur doit être conçu avec des matériaux qui ne se corrodent pas.

Dans les économiseurs à contact direct, l'eau est vaporisée directement dans les gaz de carneau et l'eau chaude qui est ainsi générée est recueillie et utilisée après traitement afin de neutraliser son potentiel de corrosion. Grâce aux économiseurs à condensation, les rendements globaux des chaudières peuvent être supérieurs à 90 %. [8]

c) Récupération de chaleur générée par la purge

Nous avons présenté auparavant quelques moyens permettant de limiter le volume de purge et la perte de chaleur. Les échangeurs thermiques peuvent récupérer la chaleur sensible générée par la purge et s'écoulant dans le réseau d'égouts afin de chauffer l'eau d'appoint de la chaudière et effectuer d'autres activités similaires.

I.26. Amélioration de l'efficacité énergétique [8]

Pour optimiser le rendement et améliorer l'efficacité énergétique d'une chaudière, il faut considérer certains facteurs, tels l'entretien régulier et les petites remises en état. Quand il s'agit d'apporter une amélioration importante, il faut également tenir compte d'autres facteurs.

Une approche systématique d'amélioration de l'efficacité énergétique des chaudières, plutôt que des améliorations faites sans méthodes, comprend quelques étapes simplifiées telles qu'elles sont présentées dans la Figure ci-dessous :

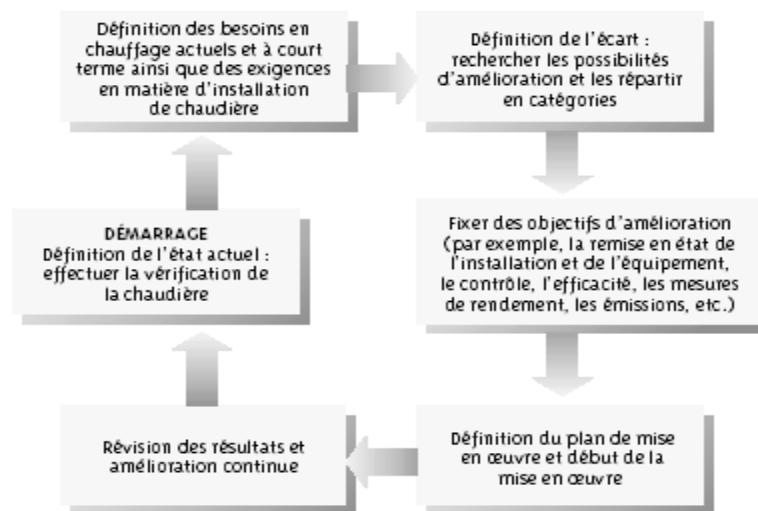


Figure I.27 : Programme d'amélioration de l'efficacité des chaudières. [8]

-Les étapes suivantes feront partie d'un cycle :

- Démarrage – Définition de l'état actuel : effectuer la vérification de la chaudière
- Définition des besoins en chauffage actuels et à court terme ainsi que les exigences en matière d'installation de chaudière
- Définition de l'écart : rechercher les possibilités d'amélioration et les répartir en catégories
- Fixer des objectifs d'amélioration
- Définition du plan de mise en œuvre et début de la mise en œuvre
- Révision des résultats et amélioration continue.[8]

Une vérification de la chaudière permettra probablement de déceler les pertes et les inefficacités énergétiques. L'objectif d'une gestion de l'énergie adéquate est de minimiser ces

anomalies et les résultats peuvent être importants tant en ce qui concerne les économies que les émissions.

La Figure I.28 donne un aperçu pratique des éléments qui doivent être visés par les activités de conservation de l'énergie. Toutefois, quelle que soit l'importance de l'exploitation économique et efficace d'une chaudière, il ne faut pas se contenter d'examiner ce seul point. Si l'objectif est de réaliser des économies et d'améliorer la récupération d'énergie, il est nécessaire de vérifier les éléments suivants :

- Les besoins en chauffage et les aspects de l'efficacité énergétique des procédés, des produits et des pièces d'équipement consommant de la chaleur;
- Les systèmes de distribution de chaleur (tels que la vapeur et le condensat).

La réduction des pertes de chaleur et d'énergie d'une chaudière peut être réalisée grâce à plusieurs méthodes dont certaines comme la production combinée de chaleur et d'électricité (cogénération) sont élaborées et complexes. D'autres, au contraire, sont faciles à appliquer et offrent de bons résultats.[8]

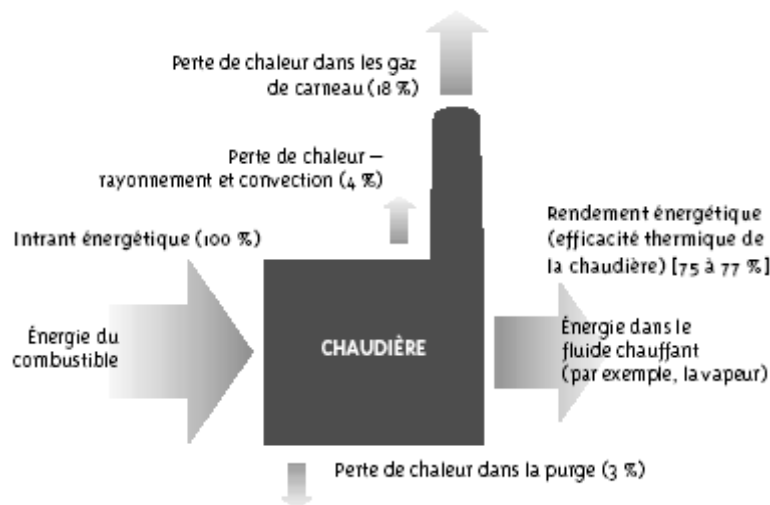


Figure I.28 :Équilibre énergétique type d'une chaudière ou d'un système de chauffage (avant les améliorations). [8]

-Les principaux paramètres contrôlés pour un meilleur rendement énergétique de la chaudière sont :

- La température ambiante, la température de fumée, la concentration en oxygène et la concentration en CO.

- Les analyseurs de gaz de combustion électroniques calculent l'excès d'air, le rendement de la combustion, et les pertes

a) Température de fumée

Ce paramètre dépend de la construction de la chaudière et des allures de la combustion, en général on note la température de fumée dans le journal de la chaudière comme valeur comparative, si la température d'une chaudière monte au cours du temps avec le même réglage; même allure et même excès d'air, on peut penser à un encrassement des tubes de la chaudière par le tartre, les sels ou le noir de carbone, cet encrassement réduit l'échange thermique entre l'eau et la fumée, la température de fumée monte et le rendement de la combustion chute

b)- Concentration en oxygène et excès d'air

L'excès d'air est nécessaire pour obtenir une réaction combustion complète du carburant, en même temps l'air qui injecté dans le foyer d'une chaudière qui ne contribue pas à la combustion réduit le rendement, parce qu'il entre à la température ambiante, il s'échauffe et sort à la température de fumée.

La valeur type de l'excès d'air dépend du type de combustible et de sa pulvérisation, à titre indicatif il est conseillé d'avoir un excès d'air inférieur à 15% pour les combustibles gazeux, 25% pour les combustibles liquides claires, et 40% d'excès d'air pour le fuel et les combustibles solides.

Pour augmenter ou réduire l'excès d'air dans une chaudière on agit sur les volets d'air du brûleur ou sur le débit du carburant

b) Concentration en CO

Le CO se produit surtout lorsqu'il n'y a pas suffisamment d'excès d'air. Au cas où on a en même temps un excès d'air et une forte concentration en CO il faut revoir la pulvérisation du carburant et le mécanisme de mélange air carburant du brûleur. Le gaz CO présente une forme de carburant imbrûlé et peut exploser à des concentrations supérieures à 30 000 ppm

c) Contrôle des émissions atmosphériques

Plusieurs analyseurs de gaz comportent des modules de contrôle des gaz toxiques tel que les oxydes d'azote NO et NO₂, les oxydes de soufre SO₂, les imbrûlés C_xH_y

-Le rôle du traitement de l'eau:

- Protéger l'équipement et le réseau
- Protéger la performance de la chaudière
- Protéger les opérations associées

- Protéger le personnel d'application

En tenant compte de:

- La conception des chaudières
- La pression et le mode d'opération
- Le pourcentage d'eau d'appoint
- La température d'alimentation
- La métallurgie et l'étendue du réseau
- La qualité d'eau disponible

-Contrôle de la corrosion par oxygène pour éviter:

- Piqûres dans la section interne de la chaudière
- Détérioration du réservoir et ligne d'alimentation
- Encombrement de la tuyauterie d'alimentation

-Contrôle de la corrosion acide pour éviter:

- Amincissement de la paroi de la tuyauterie de condensat
- Détérioration des échangeurs de chaleur
- Encrassement des purgeurs, réservoirs et chaudières

-Contrôle de l'entartrage et de l'encrassement pour éviter:

- Pertes de transfert de chaleur
- Réduction de puissance de production de vapeur
- Encombrement des surfaces
- Risque de surchauffe et de rupture de tubes

-Contrôle de l'emportement d'eau pour éviter:

- Vapeur humide
- Réduction de performance du séchage
- Contamination de la vapeur
- Opération erratique de la chaudière

-Programme de traitement conventionnel typique

- Adoucissement de l'eau par échangeur d'ions
- Préchauffage de l'eau d'alimentation
- Ajout d'un neutralisant d'oxygène
- Ajout d'amines volatiles neutralisantes
- Ajout de dispersants de boues

- Ajout d'un agent alcalin tel que la soude caustique
- Purge contrôlée pour ajuster la concentration des solides dissous
- Analyses de contrôle

-Impact sur les besoins de purge de la chaudière

- Produit tout organique
- Aucune contribution à la salinité de l'eau des chaudières
- Besoins de purge diminués drastiquement tout en respectant les standards de l'industrie

-Impact sur la qualité de la vapeur

- Diminution de la charge de solides et alcalinités de l'eau
- Réduction du moussage et de l'emportement
- Amélioration de la qualité et pureté de la vapeur

-Impact sur le transfert d'énergie

- Film hydrophobe favorise la formation de bulles de vapeur
- Facilite la nucléation sur les surfaces métalliques
- Réduit la formation de magnétite pour optimiser le transfert d'énergie à l'eau

-Impact sur l'opération du système de vapeur

- Plus grande stabilité du programme de traitement
- Réduction des interventions et des contrôles

Chapitre II

Méthodes de calcul du rendement du générateur de vapeur

II.1. Introduction

Pour déterminer la performance de la chaudière (générateur de vapeur) et calculer son rendement on doit faire une étude détaillée sur la combustion car cette dernière a une grande influence sur le fonctionnement de la chaudière.

II.2. Définition de la combustion

La combustion est l'oxydation des éléments inflammables du combustible par l'oxygène de l'air qui porte le nom de comburant. C'est une réaction exothermique, c'est-à-dire provoque un dégagement de chaleur. La combustion est dite complète lorsque tous les éléments inflammables ont été oxydés. Dans ce cas toute la chaleur qui a été obtenue représente le pouvoir calorifique (nombre de kilocalorie par kilogramme qu'ils sont capables de fournir en brûlant [9] du combustible (gaz naturel, fuel-oil) par (*kcal/kg* de combustible).

II.3. Type de combustion

II.3.1. La combustion théorique (neutre)

C'est une combustion en présence d'air apportant exactement le volume d'oxygène nécessaire pour l'ensemble des réactions. Il s'agit toutefois d'un objectif idéal dans la majorité des cas utopiques.

II.3.1.1 Résultat de la combustion neutre (théorique)

Le tableau ci-dessous représente l'évaluation de la quantité d'air nécessaire pour la combustion neutre, ainsi que la quantité des fumées produite :

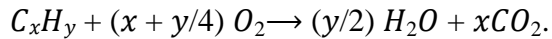
Constituant	Nombre de mole en réaction				Quantité du chaque constituant (<i>mol</i>)						
	<i>gaz</i>	<i>CO₂</i>	<i>H₂O</i>	<i>O₂</i>	Combustible	Air théorique		Fumées théorique			
						<i>N₂</i>	<i>O₂</i>	<i>N₂</i>	<i>CO₂</i>	<i>H₂O</i>	
<i>CH₄</i>	1	1	2	2	84.27	-	1.6854	-	0.8427	0.1685	
<i>C₂H₆</i>	1	2	3	7/2	8.8	-	0.3080	-	0.1760	0.2640	
<i>C₃H₈</i>	1	3	4	5	1.74	-	0.0870	-	0.522	0.0696	
<i>nC₄H₁₀</i>	1	4	5	13/2	0.35	-	0.0227	-	0.0140	0.0175	
<i>iC₄H₁₀</i>	1	4	5	13/2	0.21	-	0.0136	-	0.0084	0.0105	
<i>nC₅H₁₂</i>	1	5	6	8	0.08	-	0.0064	-	0.0040	0.0048	
<i>iC₅H₁₂</i>	1	5	6	8	0.07	-	0.0056	-	0.0035	0.0042	
<i>nC₆H₁₄</i>	1	6	7	19/2	0.05	-	0.0047	-	0.0030	0.0035	
<i>N₂</i>	1	-	-	-	3.4	-	-	-	0.034	-	
<i>CO₂</i>	1	-	-	-	1.03	-	-	-	0.0103	-	
Total	-	-	-	-	100%	8.021584	2.1334	7.98	1.1106	2.0553	
							$Q_{AN} = 10.154984 \text{ mol}$		$Q_{FSN} = 9.166184 \text{ mol}$		
							$Q_{FHN} = 11.221484 \text{ mol}$				

Tableau II.1 :Présentation et évaluation des résultats de la combustion neutre [11]

II.3.2. La combustion réelle

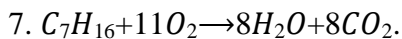
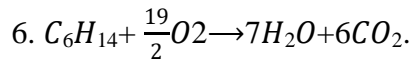
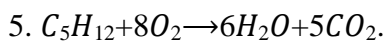
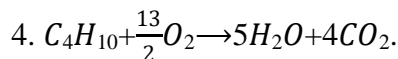
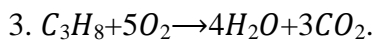
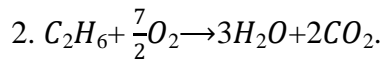
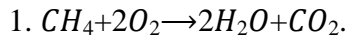
C'est la combustion donnée par $1Nm^3$ du gaz associé à un volume d'air théorique qui sert à assurer l'oxydation complète du CO et H_2 . Le reste d'air en excès ne participe pas à la combustion et se trouve intégralement dans les produits de combustion.

Pour un hydrocarbure (C_xH_y), la combustion complète se traduit par le bilan suivant [10]:



Par contre, la combustion incomplète d'un hydrocarbure, peut donner un mélange de monoxyde de carbone (CO) (dangereux), de dioxyde de carbone, d'eau, de carbone, de dihydrogène, etc.[10].

Pour cela, les différentes réactions sont :



On vient de voir que, pour le même poids de carbone, il faut deux fois plus d'oxygène pour obtenir du CO_2 que du CO . Donc, la présence de CO dans les fumées est un signe de manque d'oxygène (manque d'air) [9].

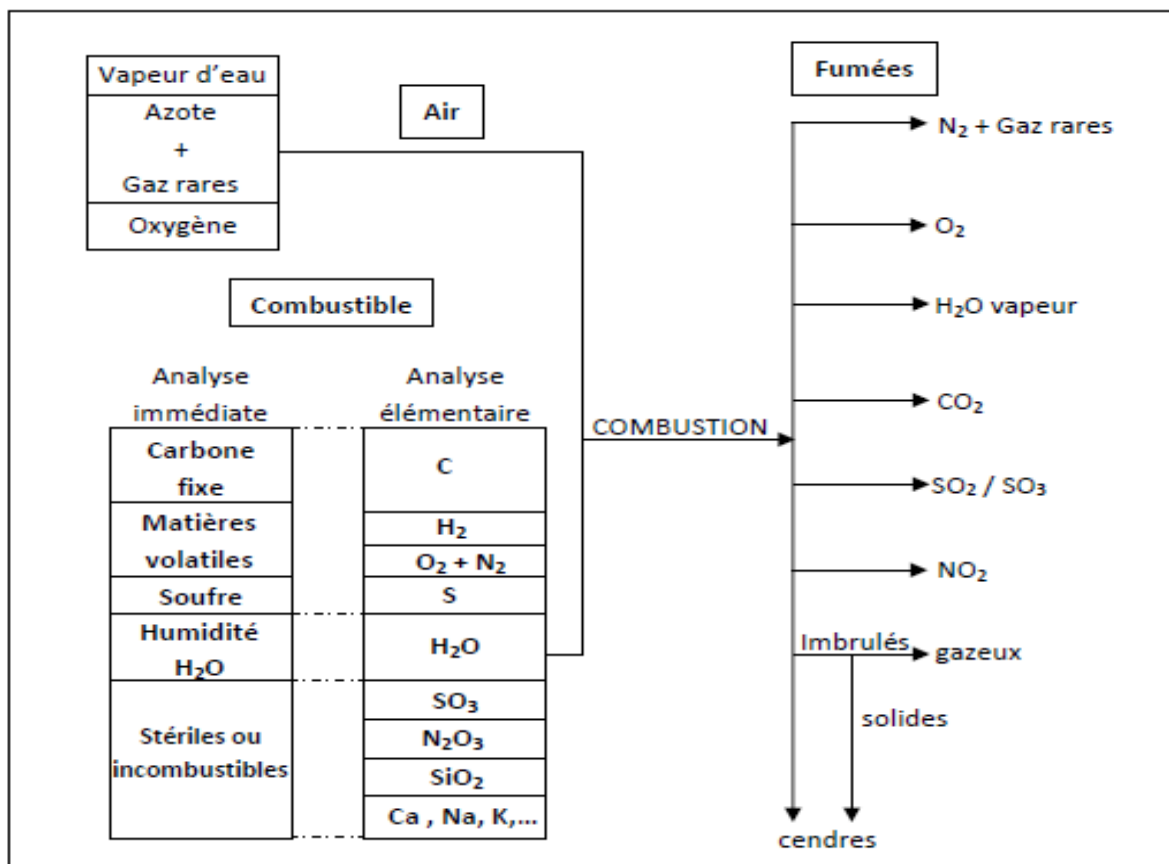


Figure II.1:Diagramme de la combustion. [9]

II.4.Détermination de rendement de la chaudière en fonctionnement normal

Sous le vocable calcul de chaudière se cachent deux significations différentes :

- La première est la détermination principale des éléments constituant la chaudière : foyer, surface d'échange, etc. Cette détermination implique à la fois la nécessité de calculer et aussi celle de choisir, parmi un grand nombre de solutions possibles, les mieux adaptées de ce que l'on attend du matériel.

- La deuxième est le calcul proprement dit, lorsqu'il s'agit de déterminer le comportement d'un ensemble défini dans ses dimensions et ses paramètres principaux de fonctionnement, pour différentes allures ou données pouvant être modifiées concernant le combustible, l'excès d'air, les débits, les températures, etc.[15]

II.4.1. Détermination des puissances

Le bilan énergétique de la chaudière est déterminé par le calcul des trois puissances :

- La puissance introduite.
- La puissance perdue.
- La puissance utile.

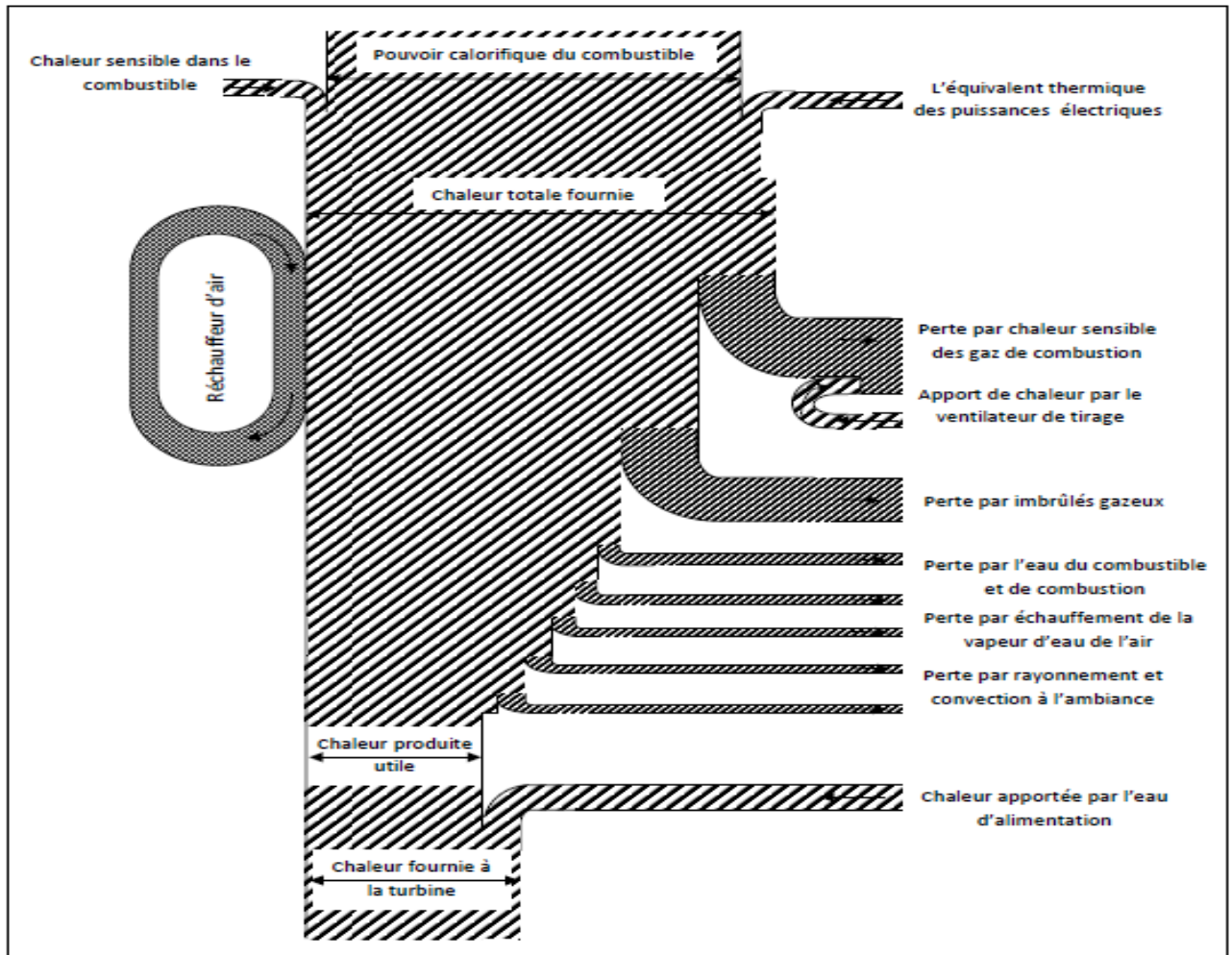


Figure II.2: Représentation schématique du bilan thermique d'un générateur à vapeur. [15]

II.5.Determination des pertes thermiques

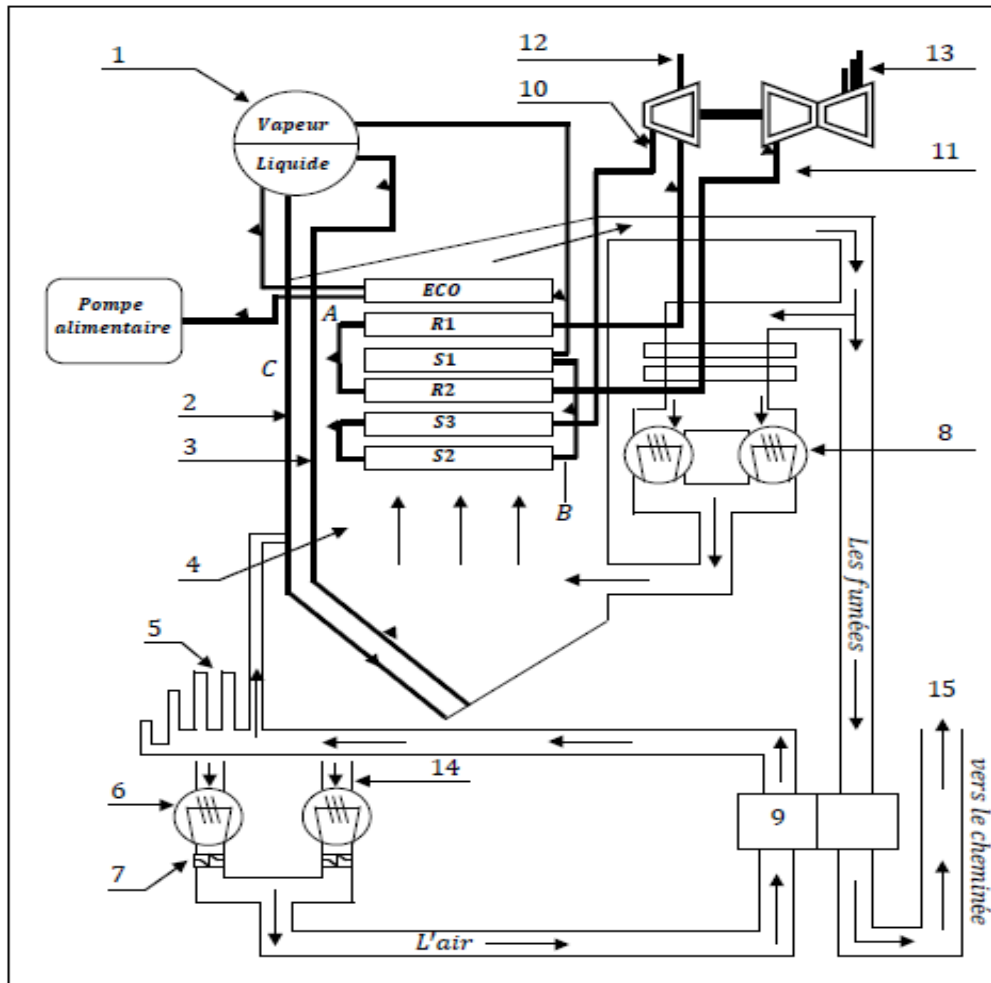


Figure II.3:Schéma de circuit air, fumée de la chambre. [15]

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1. Ballon de la chaudière | 10. La vapeur entrante à la turbine HP. |
| 2. Colonne de descente. | 11. La vapeur entrante à la turbine MP. |
| 3. Tube d'écrans. | 12. La vapeur sortante de la turbine HP. |
| 4. Evaporateur. | 13. Soutirage de la turbine MP. |
| 5. Gaine d'air pour les brûleurs. | 14. La gaine d'aspiration. |
| 6. Ventilateur de soufflage. | 15. Fumées sortantes de la cheminée. |
| 7. Préchauffeur de vapeur. | A. Les resurchauffeurs. |
| 8. Ventilateur de recyclage. | B. Les surchauffeurs. |
| 9. Le réchauffeur d'air rotatif. | C. Le générateur de vapeur. |

La détermination des pertes thermiques consiste à déterminer la chaleur perdue par la chaudière, qui est calculée par la relation suivante :

$$\sum \text{pertes} = L_g + L_{mf} + L_h + L_{ma} + L_B + L_{CO} \quad (\text{I.1})$$

Avec:

L_g : Perte de chaleur dans les fumées sèches.

L_{mf} : Perte de chaleur due à l'humidité dans le combustible.

L_h : Perte de chaleur due à l'humidité dérivante de la combustion de l'hydrogène du combustible.

L_{ma} : Perte de chaleur due à l'humidité dans l'air.

L_B : Pertes par rayonnement et convection.

L_{CO} : Perte de chaleur due à la formation d'oxyde de carbone.

II.5.1. Perte de chaleur dans les fumées sèches (L_g)

C'est la quantité de chaleur ramenée à l'extérieur avec les fumées sèches évacuées.

Elle est donnée par la relation suivante :

$$L_g = W_g \times CP_m \times (Tf'_2 - T_{ref})$$

Tel que :

W_g : Masse de gaz de combustion kg/kg de masse de combustible.

$$W_g = \frac{11(CO_2) + 8(O_2) + 7(N_2 + CO)}{3(CO_2 + CO)} \times (C_b + \frac{3}{8}S) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

CO_2 ; CO ; O_2 : D'après les analyses des fumées.

C_b ; S : Teneur en carbone et en soufre dans le combustible (analyse de combustible).

Cp_m : Chaleur spécifique moyenne des fumées.

Tf'_2 : Température corrigée des fumées à la sortie de réchauffeur d'air rotatif.

$$Tf'2 = \frac{T_{ref} \times (T_{f1} - T_{f2}) + T_{f1} \times (T_{f2} - T_{al})}{(T_{f1} - T_{al})} \quad (II.3)$$

Où :

T_{f1} : Température d'essai fumées à l'entrée de réchauffeur d'air rotatif.

T_{f2} : Température d'essai fumées à la sortie de réchauffeur d'air rotatif.

T_{al} : Température d'essai à la sortie de ventilateur de soufflage.

T_{ref} : Température de référence.

On définit une température de référence qui est calculée comme suit :

$$T_{ref} = T_{amb-p} + T_{al} - T_{amb} \quad (II.4)$$

Où :

T_{amb} : Température ambiante d'essai.

T_{amb-p} : Température ambiante de projet.

II.5.2. Perte de chaleur due à l'humidité dans le combustible (L_{mf})

Ces pertes sont dues à la présence de l'humidité dans le combustible elles sont données par la relation suivante :

$$L_{mf} = \frac{moist}{100} \times (H_2 - H_{vap}) \quad (II.5)$$

H_2 : Enthalpie de la vapeur à pression Partielle de l'humidité et à Tf'_2 .

H_{vap} : Enthalpie de vapeur saturée à T_{ref} .

moist : la teneur en humidité.

Le combustible utilisé dans la centrale thermique de Jijel est le gaz naturel, c'est pour ça que la teneur en humidité est négligeable (moist = 0).

II.5.3. Perte de chaleur due à l'humidité dérivante de la combustion de l'hydrogène du combustible (L_h)

La combustion de gaz naturel résulte le CO_2 et H_2O , le H_2O absorbe une quantité de chaleur lors de sa vaporisation cette quantité est calculée comme suit

$$L_h = 8.936 \times h \times (H_2 - H_1) \quad (II.6)$$

Où :

h : Teneur en dihydrogène (H_2) du combustible en %

H_1 : Enthalpie du liquide saturée à T_{ref}

H_2 : Enthalpie de la vapeur à pression Partielle de l'humidité et à Tf'_2 .

II.5.4. Pression partielle

Elle est donnée par :

$$P_{partielle} = \frac{P_a}{1 + \frac{1.5 \times C_b}{mg \times (CO + CO_2)}} \quad (II.7)$$

Avec :

P_a : Pression atmosphérique.

mg : Masse de l'humidité dans les fumées.

Elle est donnée par :

$$mg = 8.963 \times H \times W_{ma} \times W_a \quad (II.8)$$

W_{ma} : Humidité absolue dans l'air.

W_a : Masse d'air sec rapportée à la masse du combustible.

$$W_a = \frac{1}{0.7685} \left[\frac{28.02 \times N_2 \times (C_b + S \frac{12.01}{32.07})}{12.01 \times (CO_2 + CO)} - N \right] \quad (II.9)$$

II.5.5. Perte de chaleur due à l'humidité dans l'air (L_{ma})

L'air contient avec l'oxygène et l'azote, quelques traces de vapeur d'eau, les pertes dues à l'échauffement de cette humidité sont données par la relation suivante :

$$L_{ma} = W_{ma} \times W_a \times (H_2 - H_{vap}) \quad (II.10)$$

II.5.6. Pertes par rayonnement et convection (l_B)

L'ensemble de la chaudière cède de la chaleur par rayonnement et convection au milieu extérieur. Elle est estimée par la relation :

$$l_B = \frac{l_b}{G_{combustible}} \quad (II.11)$$

Avec :

L_b : Puissance perdue par rayonnement ; estimée par le constructeur.

$G_{combustible}$: Débit de combustible

II.5.7. Perte de chaleur due à la formation d'oxyde de carbone (L_{co})

Les pertes de chaleur par les imbrulés gazeux (présence dans les fumées de trace de CO , H_2 , CH_4). En général on considère que le monoxyde de carbone (CO) ; en utilisant la relation suivante :

$$l_{co} = \frac{CO}{CO+CO_2} \times 5644 \times C_b \text{ (II.12)}$$

Avec :

CO, CO_2 : Depuis l'analyse des fumées à la sortie de réchauffeur d'air.

C_b : Masse de carbone brûlé kg/kg de masse de combustible alimenté.

II.6. Puissance introduite (P_{int})

La puissance introduite par combustible est proportionnelle au débit de combustible brûlé. La réaction de combustion n'est pas toujours complète ; suivant l'excès d'air utilisé, la qualité des brûleurs ou des systèmes de combustion, la taille du foyer ou la préparation du combustible, une partie de celui-ci ne brûle pas [15].

II.6.1. Quantité de chaleur introduite (Q_{int})

Elle est donnée par la relation suivante :

$$Q_{int} = B_{fe} + B_{xe} + PCS \text{ (II.13)}$$

II.6.2. Pouvoir calorifique supérieur (PCS)

Le PCS est la quantité de chaleur dégagée par $1kg$ de combustible, et est calculée à la température $T_{combustible}$ et la pression de $0.165 atm$.

D'une mesure continue et à une procédure de calcul informatisée, d'une détermination permanente du rendement. On ne peut faire confiance à la valeur affichée pour le rendement qu'à condition que le pouvoir calorifique du combustible soit non seulement bien connu mais reste constant (gaz naturel, par exemple) [12].

II.6.3. Chaleur sensible fournie au combustible (B_{fe})

C'est la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer $1kg$ de combustible de la température du combustible, à la température de référence.

Elle est donnée par la relation suivante :

$$B_{fe} = CP_c \times (T_{combustible} - T_{ref}) \quad (\text{II.14})$$

Avec, CP_c est la chaleur spécifique moyenne du combustible.

II.6.4. Équivalent thermique de la puissance fournie à la chaudière (B_{xe})

L'énergie électrique B_{xe} est l'équivalence thermique de la puissance électrique fournie à la chaudière pour le fonctionnement du réchauffeur d'air rotatif, et des ventilateurs de recyclage. Cette énergie est donnée par la relation suivante:

$$B_{Xe} = 860 \frac{\eta_{RAR} \times P_{RAR} + \eta_{VR} \times P_{VR}}{G_{combustible}} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

η_{RAR} : Rendement nominale du moteur électrique de réchauffeur d'air rotatif.

η_{VR} : Rendement nominale du moteur électrique de ventilateur de recyclage.

P_{RAR} : Puissance du moteur électrique de réchauffeur d'air rotatif.

P_{VR} : Puissance du moteur électrique de ventilateur de recyclage.

- La puissance introduite par l'air dans la chaudière sous forme d'enthalpie sensible : elle n'est à prendre en compte que lorsque la chaleur a été fournie par une source extérieure au système. C'est le cas lorsque l'on préchauffe l'air, avant son introduction dans le réchauffeur d'air, soit pour la protection contre la corrosion des zones basse température, soit pour assurer une meilleure combustion [15].
- De la connaissance du débit de combustible résulte la possibilité de calculer les débits d'air et de fumées [13].

La puissance introduite est le produit entre la chaleur introduite et le débit de combustible qui dépend de la température des fumées et des taux de fuites.

$$P_{int} = (B_{fe} + B_{xe} + PCS) \times G_{combustible}$$

$$P_{int} = Q_{int} \times G_{combustible} \quad (\text{II.16})$$

II.7. Puissance utile

La quantité de chaleur utile est calculée par :

$$Q_u = Q_{int} - \sum \text{pertes} \quad (\text{II.17})$$

Ensuite on en déduit la puissance utile.

$$Puissance\ utile = Puissance\ introduite - Puissance\ perdue$$

II.8. Détermination du rendement de la chaudière

On a:

$$\text{rendement} = \frac{\text{puissance utile}}{\text{puissance introduite}}$$

$$\text{rendement} = \frac{\text{quantité de chaleur introduit} - \sum \text{pertes}}{\text{quantité de chaleur introduit}}$$

$$\text{rendement} = 1 - \frac{\sum \text{pertes}}{Q_{int}} \quad (\text{II.18})$$

Donc le rendement de la chaudière par la méthode indirecte en incluant le circuit air-fumée se calcule par :

$$\eta_{CHD} = 1 - \frac{L_g + L_{mf} + L_h + L_{ma} + L_b + L_{CO}}{B_{fe} + B_{xe} + PCS} \quad (\text{II.19})$$

II.9. Calcul du rendement de générateur de vapeur par la méthode directe

Selon cette méthode, on mesure le rendement de la chaudière par le rapport de la chaleur utile rendu par la chaudière sur l'énergie contenu dans le combustible :

$$\text{rendement} = \frac{\text{puissance utile}}{\text{puissance fournie}} \quad (\text{II.20})$$

Cette méthode exige de connaître le pouvoir calorifique du combustible ainsi que la chaleur produit par la chaudière sous forme de vapeur

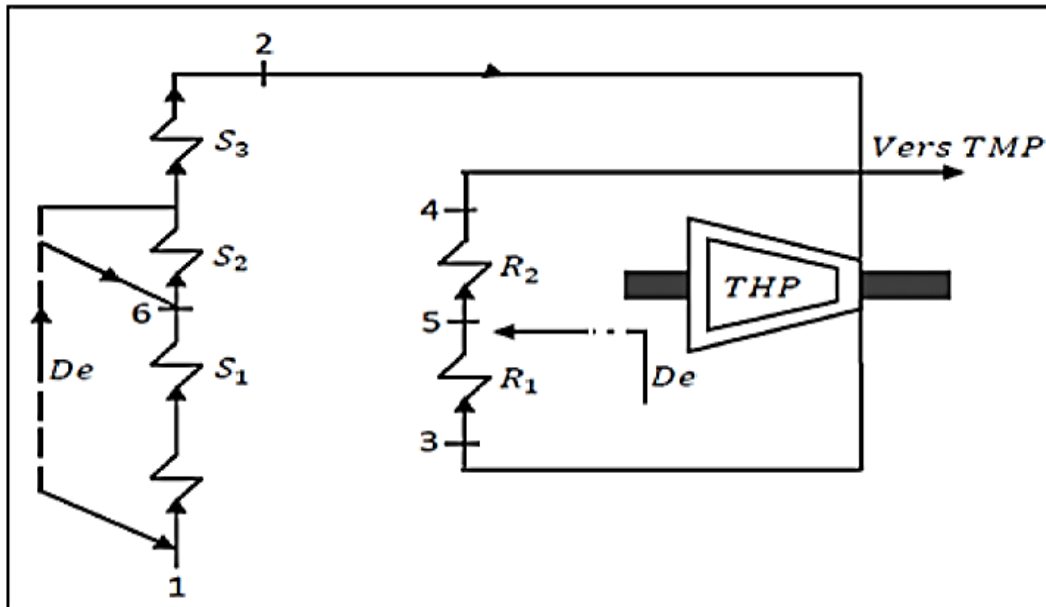


Figure II.4: détermination des enthalpies dans la chaudière. [14]

De : désurchauffeur

S : surchauffeur

R : resurchauffeur

THP : corps haute pression de la turbine

- Pour déterminer la valeur de l'enthalpie aux différents points, nous allons utiliser un logiciel de calcul intitulé REFPROP, pour cela nous avons besoin des pressions et des températures en chaque point.[14]

Chapitre III

Résultats et interprétations

III.1 Données sur l'application

Notre application est faite sur la centrale thermique Sonelgaz (SPE – Jijel). Cette dernière fournit une puissance électrique de 600 MW et comporte trois tranches chacune 200 MW. Toutes les fonctions importantes d'une tranche sont commandées et surveillées à partir d'une salle de commande.

La centrale de Jijel représente une synthèse de plusieurs technologies. Beaucoup d'entreprises internationales ont participé à sa construction comme le montre le Tableau III.1. La chaudière, l'objet de notre étude, est de technologie Russe ; elle est de type à circulation naturelle avec dépression. Son schéma représentatif est donné par la Figure III.1 et les paramètres de fonctionnement sont donnés par le Tableau III.2.

La chaudière représente un des éléments principaux de la centrale ; ces caractéristiques de fonctionnement sont :

- Pression de sortie de la vapeur surchauffée : 130 bars
- Température de sortie de la vapeur surchauffée : 545 °C
- Pression de sortie de la vapeur resurchauffée : 27 bars
- Température de sortie de la vapeur resurchauffée : 545 °C
- Pression de sortie de la vapeur saturée : 135 bars (sortie ballon)
- Température de sortie de la vapeur saturée : 380°C
- Température d'entrée chaudière (eau alimentaire) : 240°C

Les brûleurs de la chaudière sont de type horizontal fonctionnant au gaz ou au fuel.

Équipement	Constructeur	Pays
Générateur électrique	T.P.E	Russie
Turbine	LMZ	Russie
Générateur de vapeur	T.P.E	Russie
Chaudière auxiliaire	T.P.E	Russie
Pompes alimentaires	Pompe : KSB Moteur : ANSALDO Coupleur : VOITH	Allemagne Italie Allemagne
Échangeurs de chaleurs	T.P.E SERCK (Pompes alimentaire)	Russie Allemagne
Réchauffeur d'air	T.P.E	Russie
Pompe du circuit fermé de refroidissement	T.P.E	Russie
Système de déminéralisation	CASTAGNETTI	Italie
Condenseur	T.P.E	Russie
Pompes de circulation et leur moteur	KUBOTA	Japon
Transformateur principal	T.P.E	Russie
Transformateurs auxiliaires	T.P.E	Russie
Diesel de secours	Alternateur : ABB Moteur Diesel : T.P.E	Finland Russie
Système d'hypochlorite de sodium	CASTAGNETTI	Italie
Pompes de circulation moteur	KUBOTA	Japon
Système de dessalement d'eau de mer	CASTAGNETTI	Italie

Tableau III.1 :Liste des participants dans la construction de la Centrale Thermique de Jijel

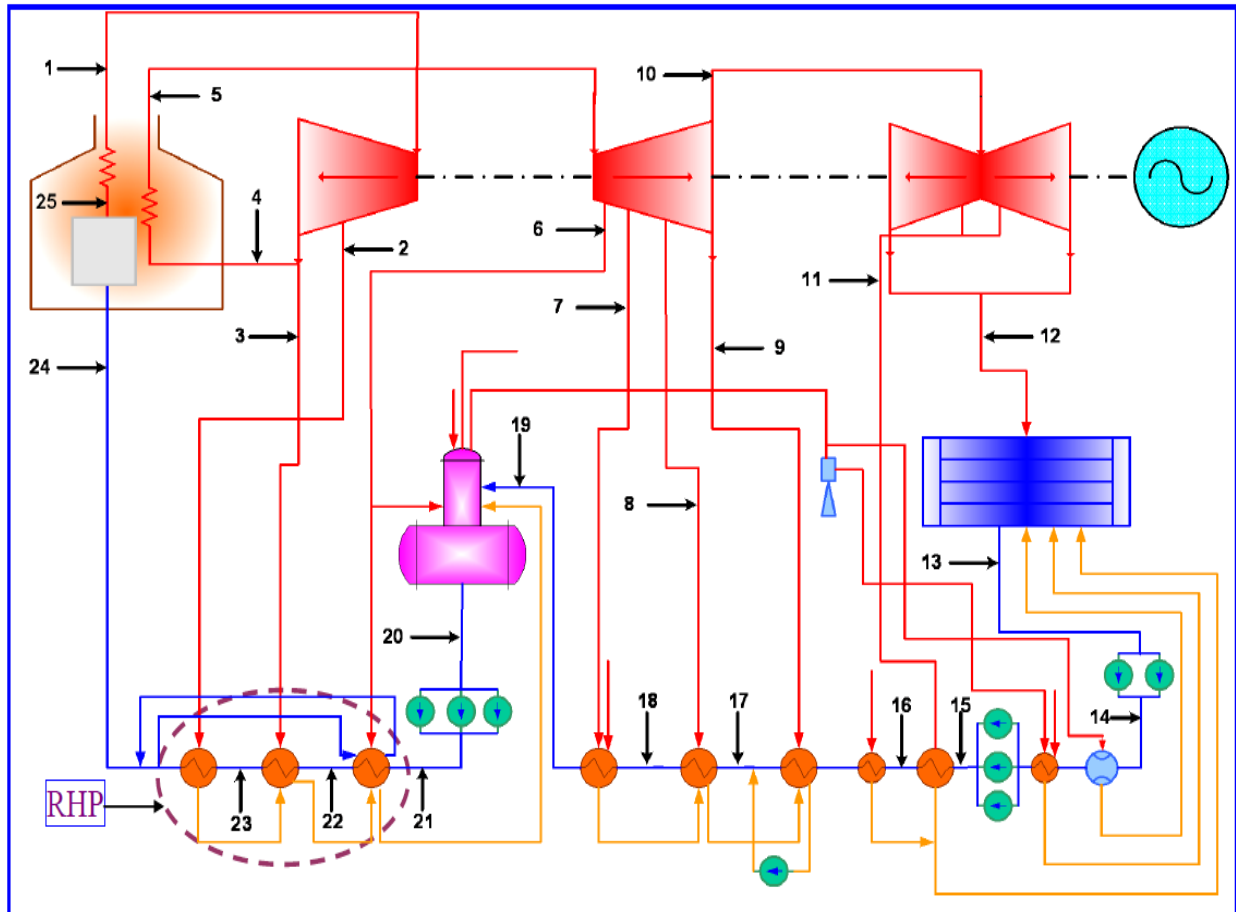


Figure III.1 :Schéma de la centrale de Jijel

Dans le Tableau III.3, nous avons résumé les données spécifiques de la centrale thermique de Jijel. Cette centrale a été mise en service en 1992, elle comptabilise 28 années de service. Le Tableau III.3 présente les consommations spécifiques pour la période à l'an 2000 à 2003. La consommation spécifique donne une information directe sur le rendement de la centrale et d'une façon indirecte, sur le rendement de la chaudière.

Durant la période de 2000 à 2003, la centrale a été l'objet de plusieurs révisions générales. Malgré ces revêtions il a été constaté que la consommation spécifique et le rendement se sont dégradés par rapport au valeur de garantie. Après, il a été décidé de prendre en compte la durée de fonctionnement de la centrale et de modifié la référence de comparaison, sans oublié que la chaudière est un élément d'un système et qu'elle est influencée par le dysfonctionnement des autres éléments du fonctionnement du cycle thermodynamique.

N°	Pression en bars	Température en °C	Débit t/h
01	127.5	540	617.4
02	39.2	378	31.2
03	26.7	329	43.4
04	26.7	329	533.6
05	23.4	540	533.6
06	12.2	445	18.4
07	6.42	358	25.2
08	2.67	255	19.1
09	1.27	174	27.4
10	1.25	174	450.9
11	0.263	70.2	450.9
12	0.0527	32.5	526.7
13	0.0527	33	526.7
14	8.3	33	526.7
15	15.7	33.5	526.7
16	15.4	61	526.7
17	14.8	101	617.4
18	14.3	125	617.4
19	13.7	158	617.4
20	6.9	168	617.4
21	186.3	170	617.4
22	183.9	18.9	617.4
23	181.5	219	617.4
24	178.5	244	617.4
25	155.1	340	617.4

Tableau III.2 : Relevé des paramètres, de la charge 100% du 2ème groupe [16]

	Groupe N°1	Groupe N°2	Groupe N°3
Date de mise en service	06/06/1992	01/06/1993	07/02/1994
Nombre d'heures de marche (décembre 2003)	83864.14	81582.24	76337.36
Puissance installée	196 MW	196 MW	196 MW
Puissance disponible actuellement	180 MW	180 MW	180 MW
Consommation spécifique 2000	2.567	2.570	2.582
Consommation spécifique 2001	2.570	2.573	2.568
Consommation spécifique 2002	2.807	2.657	2.610
Consommation spécifique 2003	2.773	2.658	2.645
Minimum technique	80 MW	80 MW	80 MW
Temps de synchronisation moyens après un arrêt à chaud	2 à 3 heures	2 à 3 heures	2 à 3 heures
Temps de synchronisation moyens après un arrêt à froid	4 à 6 heures	4 à 6 heures	4 à 6 heures
Puissance nette au gaz/fuel (MW)	196/196	196/196	196/196

Tableau III.3 :Données spécifique des groupes de la centrale de Jijel

Lors du fonctionnement de la centrale on fait appelle à divers équipements auxiliaire tels que les pompe de circulation d'eau de mer (fluide de refroidissement du condenseur) ou bien les ventilateurs de soufflage d'air vers le foyer de combustion. Ces équipements consomment une puissance électrique non négligeable dont nous tiendront compte le calcul du rendement par la méthode indirecte nous présentent dans le tableau III.4, c'est- la puissance de chacun de ces équipements.

Il est intéressant de signaler que suite au divers incidents survenus dans la centrale (vieillesse des équipements) il a été décidé d'abaisser le fonctionnement de base de la centrale de 196 MW à 180MW et ceci Particulièrement, pour préserver les chaudières jusqu'à leur réhabilitation générale.

Désignation	Unité	Charge
		100 %
Pompes alimentaire de chaudière	kW	2 x 3103
Pompes de circulation d'eau de mer	kW	2 x 1060
Pompes des condensats	kW	2 x 160 + 2 x 200
Pompes d'eau de mer	kW	2 x 37 + 2 x 45
Système d'hypochlorite de sodium	kW	337
Station de dessalement	kW	50
Stations de compression	kW	167 + 150
Pertes de transformateur principal du groupe	kW	200
Pertes du transformateur auxiliaire du groupe	kW	28,1
Pompe du circuit fermé de réfrigération	kW	400
Autres (ventilateurs)	kW	(1000+1000+400)
Total estimé de la consommation des auxiliaires	kW	12 000

Tableau III.4 : Consommations électrique des différents équipements de la centrale

III.2 calculs et résultats

III.2.1 calcul du rendement par la méthode directe

Nous allons présentés ci-dessous le calcul du rendement par la méthode directe pour 100% de charge et pour le quelle les pressions et les températures sont présentés dans le tableau IV.2. Chaudière de la centrale industrielle est schématisée par la figure ci-dessous :

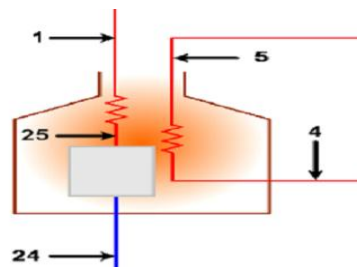


Figure III.2 : Schéma de la chaudière

Chapitre III Résultats et Interprétations

La chaudière fonctionne avec du gaz naturel algérien dans la composition et présenté dans le tableau suivant :

Constituant	Formule chimique	Fraction volumique Xi (%)	Pouvoir énergétique Pc (kJ/kmol)
Méthane	CH_4	83.50	802300
Ethane	C_2H_6	6.90	1427800
Propane	C_3H_8	2.1	2044000
Butane	C_4H_{10}	0.88	2657000
Pentane	C_5H_{12}	0.23	3272100
Azote	N_2	5.85	--
Autre gaz	--	0.54	--

Tableau III.5 : Composition en volume du gaz naturel utilisé[17]

Le rendement par la méthode directe se calcule comme suit :

$$\eta = \frac{W}{QF}$$

Avec :

- W : chaleur produite par heure
- QF : chaleur fournie par heure

-Détermination de la chaleur fournie par heure (QF) :

$$QF = pc \times Qg$$

Avec :

- Pc : le pouvoir énergétique du combustible.
- Qg : le débit de combustible.

Chapitre III Résultats et Interprétations

-Calcul du pouvoir énergétique du combustible. P_c :

En exploitant les valeurs du tableau III.5ci-dessus, et en utilisant la règle moyenne penderie.

$$P_c = \sum X_i \times P_i$$

Avec :

- X_i : fraction molaire du composant
- P_i : le pouvoir énergétique du composant. kJ/kmol

Ce qui nous donne :

$$P_c = [(0.8350 \times 802300) + (0.0690 \times 1427800) + (0.021 \times 2044000) + (0.0088 \times 2657000) + (0.0023 \times 3272100)]$$

$$P_c = 842270.13 \text{ kJ/kmol}$$

-Calcul du débit molaire du combustible(Q_g)

Le débit volumique du combustible (Q_v)

$$Q_v = 51362.10 \text{ Nm}^3/\text{kmol} \text{ (Donné)}$$

$$Q_g = \frac{Q_v}{V}$$

Avec :

- Q_v : débit volumique dans les conditions normales (Nm^3/h)
- V : volume molaire normal ($v=22.413$) (Nm^3/kmol)

$$Q_g = \frac{51362.10}{3600 \times 22.413}$$

$$Q_g = 0.6366 \text{ kmol/s}$$

-La chaleur fournie par heure est donc :

$$Q_F = p_c \times Q_g$$

$$Q_F = 842270.13 \times 0.6366$$

$$Q_F = 536189.165 \text{ kW}$$

-Détermination de la chaleur produite par heure W

Chapitre III Résultats et Interprétations

A l'aide des valeurs de la pression et la température au entré-sortie de la chaudière et ont utilisant une table numérique nous avant pu déterminé avec précision les grandeurs thermodynamiques dont nous avant besoin (enthalpie massique, entropie massique, volume massique du vapeur surchauffé). Ces valeurs sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tableau III.6). Les débits massiques mentionné correspondent au débit principale de surchauffe et de resurchauffe.

point	T (°C)	P(bar)	Qm(kg/s)	H (kJ/kg)	S (kJ/k.kg)	V (m^3/kg)	Etat physique
1	540	127.5	171.5	3447.7467	6.5881	$2.6974 \cdot 10^{-2}$	Vapeur surchauffée
4	329	26.7	148.22	3074.3047	6.7275	$9.8205 \cdot 10^{-2}$	Vapeur surchauffée
5	540	23.4	148.22	3553.3889	7.4697	$1.5803 \cdot 10^{-1}$	Vapeur surchauffée
24	244	178.5	171.5	1058.2475	2.7077	$1.2161 \cdot 10^{-3}$	Vapeur surchauffée

Tableau III.6 : Propriétés thermodynamique dans les différents points de la chaudière

- La chaleur produite par heure est donc :

$$W = Qm_{24} \times (H_1 - H_{24}) + Qm_4 \times (H_5 - H_4)$$

$$W = 171.5 \times (3447.7467 - 1058.2475) + 148.22 \times (3553.3889 - 3074.3047)$$

$$W = 409799.113 + 71009.8601$$

$$W = 480808.973 \text{ kW}$$

-Le rendement de la chaudière par la méthode directe est donc :

$$\eta = \frac{W}{QF}$$

$$\eta = \frac{480808.973}{536189.165}$$

$$\eta = 89.67\%$$

❖ **Tableau récapitulatif des résultats obtenu par notre calcul et celles obtenus par l'essai de l'entreprise pour la méthode directe :**

Résultat obtenus par notre calcul			Résultats obtenus par l'essai de l'installation pour 100 % de charge (donnée)		
Point	Enthalpie (kJ/kg)	Débit (kg/s)	Point	Enthalpie (kJ/kg)	Débit (kg/s)
1	3447.7467	171.5	1	3397.4568	-
4	3074.3047	148.22	4	3061.224	-
5	3553.3889	148.22	5	3508.698	-
24	1058.2475	171.5	24	585.48	-
Pc (kJ/kmol)	842270.13		Pc (kJ/kmol)	-	
Qg(kmol/s)	0.6366		Qg (kmol/s)	0.6366	
QF (kW)	536189.165		QF(kW)	543266.513	
W (kW)	480808.973		W (kW)	484930,78	
η (%)	89.67		η (%)	89.26	

Tableau III.7 : Tableau récapitulatif

Conclusion: On remarque que le résultat obtenu par les calculs est proche de ce obtenus lors de l'essai de l'installation pour 100% de charge.

III.2.2 calcul du rendement par la méthode indirecte

Le rendement par la méthode indirecte se calcule comme suit :

$$\eta_{ind} = 100\% - \sum \text{perte } \%$$

$$\eta_{ind} = 100 - (q_1 + q_2 + q_3)$$

Avec :

- q_1 : perte par chaleur sensible [%]
- q_2 : perte par imbrulées [%]

Chapitre III Résultats et Interprétations

- q_3 : perte par refroidissement extérieur (convection et rayonnement) [%]

Sachant que les pertes sont données par l'entreprise et leurs valeurs est :

$$\text{➤ } q_1 = 3.2018 \%$$

$$\text{➤ } q_2 = 9.0299 \%$$

$$\text{➤ } q_3 = 0.3890 \%$$

Ainsi :

$$\eta_{ind} = 1 - \frac{\sum \text{pertes}}{QF}$$

Avec :

- Pertes en[kcal/h]
- QF : chaleur fournie par heure [kcal/h]

-Détermination des pertes en [kcal]

Avec :

- $QF = 467661274$ kcal/h

$$q_1 = \frac{3.2018}{100} \times 467661274 = 14973578.7 \text{ kcal/h}$$

$$q_2 = \frac{9.0299}{100} \times 467661274 = 42229345.4 \text{ kcal/h}$$

$$q_3 = \frac{0.3890}{100} \times 467661274 = 1819202.36 \text{ kcal/h}$$

Donc :

$$\eta_{ind} = 1 - \frac{(14973578.7 + 42229345.4 + 1819202.38)}{467661274}$$

$$\eta_{ind} = 87.38\%$$

Conclusion: pour minimiser les pertes thermiques il faut assurer le bon fonctionnement des organes et le traitement de maintenance, pour avoir un meilleur rendement.

Conclusion Générale

Conclusion générale

La chaudière est l'un des éléments les plus importants dans une centrale thermique, c'est la source chaude du cycle de génération de l'énergie électrique. Son fonctionnement correct doit être au centre d'intérêt des ingénieurs de la centrale car plusieurs paramètres peuvent influencer de façon sensible son rendement. Une diminution du rendement de la chaudière, peut entraîner une diminution notable du rendement de tout le cycle et inversement une amélioration de celui-ci s'en ressent sur toute la production. Nous avons conclu que pour améliorer le rendement de la chaudière et prolonger la durée de vie de cette dernière, il faut :

- Faire un suivi rigoureux de la qualité de l'eau alimentant la chaudière pour éviter les dépôts de tartre sur les surfaces de transfert de chaleur afin de profiter au maximum de la chaleur transmise à l'eau pour la transformer en vapeur et aussi éviter la corrosion qui est causée par les dépôts de tartre, sans oublier le suivi des performances énergétiques pour évaluer son efficacité.
- Assurer une maintenance régulière des circuits de fumées et de l'air de combustion.
- Mettre à jour l'installation de la combustion surtout les analyseurs d'air et de fumées.
- Garder les équipements de la centrale en et en particulier la chaudière à leur rendement optimal.

Il en ressort qu'un bon fonctionnement des éléments de la centrale et de la chaudière, en particulier, ne peut être obtenu que par une maintenance rigoureuse et programmée une bonne exploitation de l'installation conduit à des pertes énergétiques minimales et une efficacité maximale.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] mémoire fin d'étude master (étude et amélioration du rendement de la centrale électrique de Jijel) (Automatique industriel) université badjimokhtar Annaba année 2017 par Mr : Benslimane houssemmeddine
- [2] Thèse de doctorat « étude numérique du transitoire accidentel d'une chaudière industrielle par le cde relap5/mod3.2 » université constantine 1 année
- [3] INERIS-DRA-09-102957-01582B, rapport d'étude : Référentiels, normes et guides de bonnes pratiques pour l'exploitation des chaudières industrielles au gaz 09/08/2010
- [4] rapport de projet fin d'étude « Étude de la modernisation de la chaîne de régulation de la température de vapeur à la sortie des surchauffeurs des chaudières de la Centrale Thermique de Jerada.
- [5] F. Moran, 'Traitement des eaux de chaudières', Société Concorde Chimie France, Editions Parisiennes.
- [6] Amna ZEMMOURI, Soufiane TOUATI, Abdallah HAOUAM 'Effet de la qualité de l'eau sur les performances de la centrale thermique', conférence Internationale de Mécanique, Annaba, 2017, Algérie,
- [7] H. DJEDIAI, 'traitement et conditionnement des eaux de process', Cours, Génie des Procédés de l'environnement, 2016, Université d'Oran, Algérie
- [8] G. Sylvain, 'Diagnostic du colmatage des générateurs de vapeur à l'aide de modèles physiques et statistiques', thèse Doctorat, ENM, Paris, France, 2012
- [9] Notice technique des centrales thermiques. La combustion. Fascicule N°4 B, 1961.
- [10] Nicole CORTIAL. Application du premier principe aux combustions. Document proposé sur le site « Sciences physiques en BTS », <http://nicole.cortial.net/>.
- [11] Amel LADJ. Bilan énergétique et composition des fumées de la chaudière de CAP-DJINET. Projet de fin d'études, Univ. M'hamed BOUGARA, Boumerdes, 2008.
- [12] Jean PARISOT. Conception et calcul des chaudières comportement et performances. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique.
- [13] ANSALDO. Consommation spécifique de chaudière. Centrale de Mers-El-Hadjadj, Oran, R-010, 1984.
- [14] Hayet KACED et Naçera SAIDI. Bilan énergétique du générateur de vapeur de la centrale de RAS-DJINET, Projet de fin d'études, Univ. M'hamed BOUGARA, Boumerdes, 2009.
- [15] Jean PARISOT. Conception et calcul des chaudières généralités et bilans. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique.
- [16] Le Manuel d'exploitation de SONELGAZ (1989)
- [17] Catalogue de SONELGAZ (1990)

ANNEXES

Annexe A : Script du programme MATLAB pour calculer la consommation spécifique et le rendement par la méthode directe

Annexe A : Script du programme MATLAB pour calculer la consommation spécifique et le rendement par la méthode directe

Spécifique et le rendement par la méthode directe

%calcul du débit gaz

$RO = M/R * P1/T1 * 1/Z1 * 100;$

$ROg = RO * T1/Tg * Z1/Zg;$

$\Delta P = L * (ROm - ROg);$

$Re = 4 * Qm / 3600 * \pi * \mu * D;$

$\beta = d/D;$

$c = 0.5959 + 0.0312 * \beta^{2.1} - 0.184 * \beta^8 + 0.0029 * \beta^{2.5} * (10^6/Re)^{0.78};$

$epcl = 1 - ((0.41 + 0.35 * \beta^4) * \Delta P / K * P1);$

$Qv = 3600 * \pi / 4 * c / \sqrt{1 - \beta^4} * epcl * d^2 * \sqrt{2 * \Delta P / RO};$

$Qm = 3600 * \pi / 4 * c / \sqrt{1 - \beta^4} * epcl * d^2 * \sqrt{2 * \Delta P * RO};$

%calcul de la consommation spécifique

$Qvs = Qv * P1/T1 * Ts/T1 * Zs/Z1;$

$Csp = Qv * PCS/P;$

%calcul du rendement par la méth directe $Qka = Dna * (hnn - hnb) + Dbt * (Hbt - Hb) + Dbtp * (Hbt - hgnp);$ rend = $Qka / Qv * Qp;$

%Dans la ligne "4" la variation de pression il semble qu'il manque un paramètre le "g"

l'accélération de pesanteur on a par définition: $\%P = \rho * g * H$

%Aussi est ce que le nombre de Reynolds est donnée ou on doit le calculer (ligne5)

Annexe B : Script du programme MATLAB pour calculer les pertes thermiques par la méthode indirecte

```
%Calcul rendement par la méthode indirecte
%calcul des pertes
% 1/perte de chaleur par les gaz d'échappement (q2)
A=m+n/4 ;
A1=m*Cm*Htn ;
A2=n/2*Cm*Htn ;
A3=Ci*Ki ;
K=0.00062 ;
V1=0.0467*(0.5*COt+0.5*H2t+1.5*H2St+A*CmHnt-O2t) ;
VRo2=0.01*(Co2t+Cot+H2St+A1) ;
Vn2=0.79*V1+0.01*N2t ;
Vhe=0.01*Het ;
Pn=Ps-K*Pb(Tc-Tm) ;
db=(622.1*Pn)/(Pb-Pn) ;
Vh2s=0.01*(H2St+H2t+A2+0.124*dt)+0.00161*db*V1 ;
Cxb=Ccb+0.00161*db*Ch2o ;
Vcr=VRo2+V1N2+Vh0 ;
Rm=100*VRO2/Vcr ;
Ro2=Rm*(20.96-O2)/20.96 ;
N2=100-(Ro2+O2) ;
alfa=N2/(N2-3.76*O2) ;
Iyx=((Cco2*Vro2+Cn2*Vn2+Ch0*Vh0+Ch2o*VH2o)+((alfa-1)*Cxb*V1))*Tyx ;
Ixb=alfa*CxB*V1*txb ;
Ct=0.01*(A3+0.124*CH2o*dt) ;
it=Ct*tT ;
Qp=Qh+it ;
q2=100*(Iyx-Ixb)/Qp ;
```

Annexe B : Script du programme MATLAB pour calculer les pertes thermiques par la méthode indirecte.

%comontaire: il nous manque les capacités calorifiques des composant du gaz exemple(Cco2, ✓
CN2,CH2o....)

%manque aussi la quantité d'air pour une combustion complète (V°) ;le volume des gaz ✓ triatomique les
produit de combustion(VR_{o2})

%on a quelque paramètres non défini exemple (tm;tc;txb). il nous manque toute les ✓ valeur theorique avec
indice (t)

%2/les perte de chaleur pour une combustion incomplète q3:

$CO=RO_2-CO_2$

$V_{cr1}=V_{cr}+(\alpha - 1)*V_1$

$q_3=3018*V_{cr1}*CO/Q_p$

%commentaire : le coefficient d'excès d'air (ALFA)manque sa valeur ou formule de calcul%3/les perte de
chaleur par refroidissement extérieur q5 $q_{5h}=0.32\%$

$q_5=q_{5h}*Q_{ch}*D_{neh}/Q_p*D_{ne}$

%comontaire: manque toute les valeur ($D_{neh};D_{ne}$)

Résumé

Calcul du rendement d'une chaudière à vapeur à circulation naturelle - Sonelgaz, SPE, Jijel

La production d'électricité par les centrales thermiques représente 75% de la production mondiale d'électricité.

Les chaudières qui sont générateurs de vapeur jouent un rôle prépondérant dans les centrales thermiques à vapeur. La présente étude a pour objectif: le calcul du rendement de la chaudière de la centrale de Jijel plus particulièrement la mise en relief des facteurs majeurs qui conduisent à la dégradation de ce rendement.

Les méthodes directe et indirecte sont été mises en œuvre pour le calcul des pertes de la chaudière, ce qui a conduit au calcul du rendement par chacune des deux méthodes.

Les sources de dégradation du rendement ont été aussi abordées.

Mots clés : centrale thermique à vapeur, rendement, chaudière, dégradation du rendement, amélioration.

Abstract

Calculation of the efficiency of a natural circulation steam boiler - Sonelgaz, SPE, Jijel

Electricity production from thermal power plants accounts for 75% of global electricity production.

Boilers that are steam generators play a major role in steam power plants. The objective of this study is: to calculate the efficiency of the boiler at the Jijel power station, more particularly to highlight the major factors which lead to the degradation of this efficiency.

The direct and indirect methods were implemented for the calculation of the boiler losses, which led to the calculation of the efficiency by each of the two methods.

The sources of yield degradation were also discussed.

Keywords: steam power plant, efficiency, boiler, efficiency degradation, improvement.