

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de master académique

Option : énergétique

Thème :

**Etude comparative du rendement de la chaudière du
groupe n°01 de la centrale de Cap Djinet avant et
après révision générale**

Proposé par : Mr.CHARIF Mohamed

réalisé par : BELKAID Thafath

Dirigé par : Mr.FERROUK Mohamed

Promotion : 2015 /2016

Remerciements

*Je remercie tout d'abord le bon **DIEU** de m'avoir guidé à faire les bons choix tout au long de mon cursus.*

Je remercie mes chers parents et mon cher mari pour leur soutien sans faille tout au long de la durée de ce travail.

*Mes sincères remerciements à mon encadreur **Mr. CHARIF Mohamed** pour son sérieux et pour tous les enseignements qu'il m'a prodigué pendant toute la durée de mon stage au sein de la société de production d'électricité de Cap djinet, ainsi qu'à tous ses collègues qui m'ont aidé de près ou de loin, en particulier **Mr.AKKOUCHE**.*

*Merci à **Mr. FERROUK Mohamed** mon promoteur, qui m'a guidé et conseillé tout au long de mon projet.*

Je tiens aussi à remercier tous les membres du jury qui me feront l'honneur de juger mon travail.

Je remercie enfin toute personne m'ayant aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents pour leurs sacrifices tout au long de ma vie et sans qui tout ceci n'aurait été possible.

A mon adorable mari pour son soutien et sa présence.

A mes frères Lyes et Koceila.

A mes beaux parents pour leur gentillesse.

A mes grands parents et à la mémoire de mon cher regretté grand père.

A mes oncles et mes tantes.

A toute ma famille et tous mes amis.

Table des matières

Remerciements.

Dédicaces.

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Nomenclature.

Introduction générale 1

I. Introduction 2

II. Présentation de la centrale de Cap-Djinet 2

II.1. Localisation et historique de la centrale 2

II.2. Caractéristiques techniques de la centrale 3

II.2.1. Combustibles 3

II.2.2. Générateurs de vapeur (chaudières) 3

II.2.3. Turbines 3

II.2.4. Eau de réfrigération (eau de mer) 4

II.2.5. Poste d'eau 4

II.2.6. Alternateurs 4

II.2.7. Evacuation de l'énergie 4

II.2.8. Dessalement de l'eau de mer 4

II.2.9. Station de déminéralisation 4

II.2.10. station d'électrochloration 5

II.2.11. Auxiliaires communs aux quatre tranches 5

II.2.12. Commande et contrôle 5

II.2.13. Salles de commandes centralisées 5

II.3. Fonctionnement et caractéristiques d'une tranche de production d'énergie 5

II.3.1. Caractéristiques des différents composants d'une tranche de production 6

II.3.1.1. La chaudière 6

II.3.1.2. La turbine 6

II.3.1.3. Condenseur 8

II.3.1.4. Bâche alimentaire 9

II.3.1.5. Pompes 9

A. Pompes d'extraction 9

B. Pompes alimentaires 9

C. Pompe nourricière 9

II.3.1.6. Condenseur de buées 9

II.3.1.7. Ejecteurs d'air à vapeur 10

II.3.1.8. Réchauffeurs.....	10
A. Réchauffeurs basse pression	10
B. Réchauffeurs haute pression	10
II.4. Les circuits principaux constituant la centrale de Cap d'Jinet	11
II.4.1. Circuit des combustibles.....	11
II.4.2. Circuit d'air de combustion.....	11
II.4.3. Circuit de gaz de combustion.....	11
II.4.4. Circuit d'eau et de vapeur	12
II.4.4.1. Circuit de vapeur vive (RA).....	12
II.4.4.2. Circuit de vapeur de barrage (SG)	13
II.4.4.3. Circuit de vapeur auxiliaire (RQ)	13
II.4.5. Circuits d'eau de refroidissement	13
II.5. Cycle thermodynamique de la centrale de Cap d'Jinet.....	16
II.1. Description et mode de fonctionnement du générateur de vapeur	18
II.1.1. Introduction	18
II.1.2. Historique	18
II.1.3. Définition et rôle d'un générateur de vapeur.....	19
II.1.4. Classification des générateurs de vapeur.....	19
II.1.5. Description du générateur de vapeur de la centrale de Cap d'Jinet.....	23
II.1.5.1. Caractéristiques des composants de la chaudière.....	25
II.1.5.1.1. Circuit eau-vapeur	25
A. l'économiseur	25
B. Ballon de chaudière	26
C. Colonnes de descente et écrans vaporisateurs	27
D. Surchauffeurs	28
E. Resurchauffeurs	28
II.1.5.1.2. Circuit d'air et de fumées.....	31
A. Ventilateurs de soufflage	31
B. Réchauffeur d'air rotatif.....	31
C. Ventilateurs de recyclage	32
D. Préchauffeurs d'air	33
E. brûleurs	33
F. Air de refroidissement.....	35
II.1.5.1.3. Chambre de combustion	35
II.1.5.1.4. Cheminée.....	36

II.1.5.2. Mode de fonctionnement du générateur de vapeur de la centrale de Cap Djinet	36
II.2. Introduction au phénomène de combustion	40
II.2.1. Introduction	40
II.2.2. Définitions.....	40
II.2.2.1. La combustion	40
II.2.2.2. Le facteur d'air λ	40
II.2.2.3. La richesse d'un mélange R.....	41
II.2.3. Les différents types de combustion	41
II.2.3.1. La combustion théorique ou stœchiométrique	41
II.2.3.2. La combustion réelle	41
1. La combustion oxydante (en excès d'air)	41
2. La combustion réductrice (en défaut d'air)	41
II.2.4. Les formules chimiques de la combustion	42
II.2.4.1. La réaction générale de la combustion	42
II.2.4.2. Les réactions d'oxydation qui régissent la combustion du gaz naturel.....	42
II.2.5. Définition d'un combustible	43
II.2.6. Caractéristiques physico-chimiques des combustibles.....	44
a. Le pouvoir combivore.....	45
b. Le pouvoir fumigène	45
c. Le pouvoir calorifique	45
1. Le pouvoir calorifique supérieur (PCS)	45
2. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI).....	45
d. La température de combustion.....	46
e. L'inflammabilité.....	46
II.2.7. Le comburant	46
II.2.8. L'énergie d'activation	46
II.2.9. Les paramètres les plus contrôlés dans l'analyse des gaz de combustion	47
II.2.9.1. La température des fumées.....	47
II.2.9.2. L'excès d'air.....	47
II.2.9.3. La concentration en monoxyde de carbone CO.....	47
III.1. calcul du rendement de la chaudière de la centrale de Cap Djinet par la méthode indirecte	49
III.1.1. Les différentes pertes dans la chaudière.....	49
III.1.1.1. Pertes par chaleur sensible des gaz secs	49
III.1.1.2. Pertes par chaleur latente des gaz	49

III.1.1.3. Pertes par échauffement et vaporisation de l'eau.....	49
III.1.1.4. Pertes par rayonnement.....	49
III.1.2. Bilan énergétique de la chaudière	49
III.1.3. Application de la méthode indirecte pour le calcul du rendement au générateur	50
III.1.3.1. Calcul des températures.....	51
Température de référence <i>T_{ref}</i>	51
Température corrigé à la sortie des fumées du réchauffeur d'air rotatif <i>T_{f2}</i>	51
III.1.3.2. Calcul des différentes pertes de chaleur	52
1. Pertes de chaleur dues aux gaz de combustion <i>L_g</i>	52
2. Pertes de chaleur dues à l'humidité dérivant de la combustion de l'hydrogène <i>L_H</i>	54
3. Pertes de chaleur dues à l'humidité dans le combustible <i>L_{mf}</i>	56
4. Pertes de chaleur dues à l'humidité dans l'air <i>L_{ma}</i>	57
5. Pertes de chaleur dues à la formation d'oxyde de carbone <i>L_{CO}</i>	58
6. Pertes de chaleur dues au rayonnement <i>L_B</i>	58
III.1.3.3. Calcul des crédits.....	59
1. Pouvoir calorifique supérieur <i>PCS</i>	59
2. Chaleur sensible fournie par le combustible <i>B_{fe}</i>	59
3. Equivalent thermique des puissances électriques des moteurs des réchauffeurs	60
III.1.3.4. Rendement total du générateur de vapeur par la méthode indirecte.....	62
III.1.3.5. La différence entre les deux rendements.....	63
III.2. Calcul du rendement du générateur de vapeur de la centrale de Cap Djinnet par la méthode directe	64
III.2.1. Calcul du rendement de la chaudière en négligeant les points 5 et 6	66
III.3. Récapitulation et interprétation des résultats	67
III.3.1. Interprétation des résultats	67
III.3.2. Les paramètres influençant le rendement du générateur de vapeur	68
III.3.3. Quelques opérations de maintenance et d'entretien indispensables	69
III.3.4. Critères pouvant améliorer un rendement.....	69
Conclusion générale	70
Bibliographie	
Annexes	

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma simplifié d'une centrale thermique à vapeur.....	6
Figure I.2 : Les trois corps de la turbine HP, MP et BP.....	7
Figure I.3 : constitution générale d'un condenseur par surface.....	8
Figure I.4 : Circuit eau-vapeur simplifié.....	14
Figure I.5 : Circuit de vapeur de barrage.....	15
Figure I.6 : Cycle de Rankine d'une centrale thermique à vapeur.....	16
Figure I.7 : Evolution du fluide moteur dans le diagramme T-S de la centrale thermique de Cap Djinet.....	17
Figure II.1.1 : Principe d'un générateur de vapeur à tubes de fumée.....	20
Figure II.1.2 : Principe d'un générateur de vapeur à tubes d'eau.....	20
Figure II.1.3 : Principe de la circulation naturelle.....	21
Figure II.1.4 : Principe de la circulation forcée.....	22
Figure II.1.5 : Plan d'ensemble du générateur de vapeur.....	24
Figure II.1.6 : Economiseur.....	26
Figure II.1.7 : Ballon chaudière.....	27
Figure II.1.8 : circuit eau-vapeur.....	30
Figure II.1.9 : réchauffeur d'air rotatif.....	32
Figure II.1.10 : Schéma du circuit air-fumées de la chaudière de Cap Djinet.....	34
Figure II.1.11 : Brûleur.....	35
Figure II.1.12 : Bilan thermique dans la chambre de combustion.....	36
Figure II.1.13 : Schéma synoptique de la centrale de Cap Djinet.....	38
Figure II.2.1 : Schéma de la combustion.....	43
Figure III.1.1 : Représentation schématique du bilan thermique du générateur de vapeur.....	50
Figure III.2.1 : Points de détermination des enthalpies dans la chaudière.....	64

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Paramètres de l'alternateur.....	4
Tableau I.2 : Paramètres de la vapeur au niveau de la turbine.....	7
Tableau I.3 : Paramètres des soutirages.....	7
Tableau I.4 : Paramètres du condenseur.....	8
Tableau I.5 : Paramètres de la pompe d'extraction.....	9
Tableau I.6 : Paramètres des réchauffeurs basse pression.....	10
Tableau I.6 : Paramètres des réchauffeurs haute pression.....	11
Tableau II.1.1 : Paramètres du générateur de vapeur.....	23
Tableau II.1.2 : Paramètres de l'économiseur.....	25
Tableau II.1.3 : Paramètres du ballon chaudière.....	26
Tableau II.1.4 : Paramètres des écrans vaporisateurs.....	28
Tableau II.1.5 : Paramètres des surchauffeurs.....	28
Tableau II.1.6 : Paramètres des resurchauffeurs.....	29
Tableau II.1.7 : Paramètres des ventilateurs de soufflage.....	31
Tableau II.1.8 : Paramètres du réchauffeur d'air rotatif.....	32
Tableau II.1.9 : Paramètres des ventilateurs de recyclage.....	32
Tableau II.1.10 : Paramètres des brûleurs lors d'une alimentation au gaz naturel.....	35
Tableau II.2.1 : Classification des combustibles.....	44
Tableau III.2.1 : Tableau récapitulatif des valeurs d'enthalpies de la chaudière.....	65
Tableau III.3.1 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus par la méthode indirecte.....	67

Nomenclature

- **$BTOT$** : Quantité de chaleur fournie par la chaudière. [kcal/kg]
- **B_{Ae}** :Equivalent thermique des puissances électriques des moteurs des réchauffeurs d'air et des ventilateurs de recirculation des fumées. [kcal/kg]
- **B_{fe}** :Chaleur sensible fournie par le combustible. [kcal/kg]
- **C_b** : Poids du carbone/Poids du combustible brûlé.
- **C_p** : Chaleur spécifique des fumées. [kcal/kg°C]
- **C_{pf}** : Chaleur spécifique moyenne du combustible. [kcal/kg°C]
- **$(H)_f$** : Teneur en hydrogène dans le combustible (pourcentage en poids).
- **h_2** : Enthalpie de vapeur à la pression partielle de l'humidité P_{mg} et à la température T_{f2} . [kcal/kg]
- **h_L** : Enthalpie du liquide saturé à T_{ref} . [kcal/kg]
- **H** : Teneur en hydrogène dans le combustible
- **h_V** : Enthalpie de vapeur saturée à T_{ref} . [kcal/kg]
- **I** : Intensité du courant électrique. [A]
- **L_b** : Puissance perdue par rayonnement. [kcal/kg]
- **L_B** :Pertes de chaleur dues au rayonnement. [kcal/kg]
- **L_{CO}** : Pertes de chaleur dues à la formation d'oxyde de carbone. [kcal/kg]
- **$\dot{L}_g$** : Pertes de chaleur dues aux gaz de combustion. [kcal/kg]
- **L_H** : Pertes de chaleur dues à l'humidité dérivant de la combustion de l'hydrogène. [kcal/kg]
- **L_{ma}** : Pertes de chaleur dues à l'humidité dans l'air. [kcal/kg]
- **L_{mf}** : Pertes de chaleur dues à l'humidité dans le combustible. [kcal/kg]
- **LT** : Quantité de chaleur perdue par la chaudière. [kcal/kg]
- **mg** : Poids de l'humidité dans les fumées / poids du combustible.
- **M_f** : Poids de l'humidité dans le combustible / Poids du combustible.
- **mp** : Poids d'humidité évaporée dans les cendres fondues / Poids du combustible.
- **$moist$** : Humidité dans le combustible alimenté .
- **m_{H_2O}** : Masse d'eau condensée. [kg]
- **PCS** : Pouvoir calorifique supérieur. [kcal/kg]
- **PCI** : Pouvoir calorifique inférieur. [kcal/kg]
- **P_{mg}** : Pression partielle de l'humidité. [bar]
- **P_{atm}** : Pression atmosphérique. [bar]
- **P_{RA}** : Puissance du moteur électrique du réchauffeur d'air. [KW]
- **P_{VR}** : Puissance électrique des moteurs des ventilateurs de recirculation des fumées. . [KW]
- **T_{fe}** : Température du combustible aux brûleurs. [°C]
- **T_{des}** : Température ambiante de projet. [°C]
- **T_{A1}** : Température d'essai de l'air à la sortie du ventilateur de soufflage. [°C]
- **T_{amb}** : Température ambiante d'essai de l'air. [°C]
- **T_{ref}** : Température de référence de l'air à l'entrée du réchauffeur d'air. [°C]
- **T_{f2}** : Température d'essai des fumées à la sortie du réchauffeur d'air. [°C]
- **T_{f1}** : Température d'essai des fumées à l'entrée du réchauffeur d'air. [°C]
- **T_{f2}** :Température corrigé à la sortie des fumées du réchauffeur d'air rotatif. [°C]
- **THP** : Corps haute pression de la turbine.
- **Q** : Débit du combustible. [kg/h]
- **Q_{gaz}** : Débit massique du gaz. [kg/h]
- **Q_i** : Débit massique en chaque point. [kg/h]
- **V** : Tension nominale entre les phases. [KV]
- **W_g** : Poids des fumées sèches/poids du combustible alimenté.

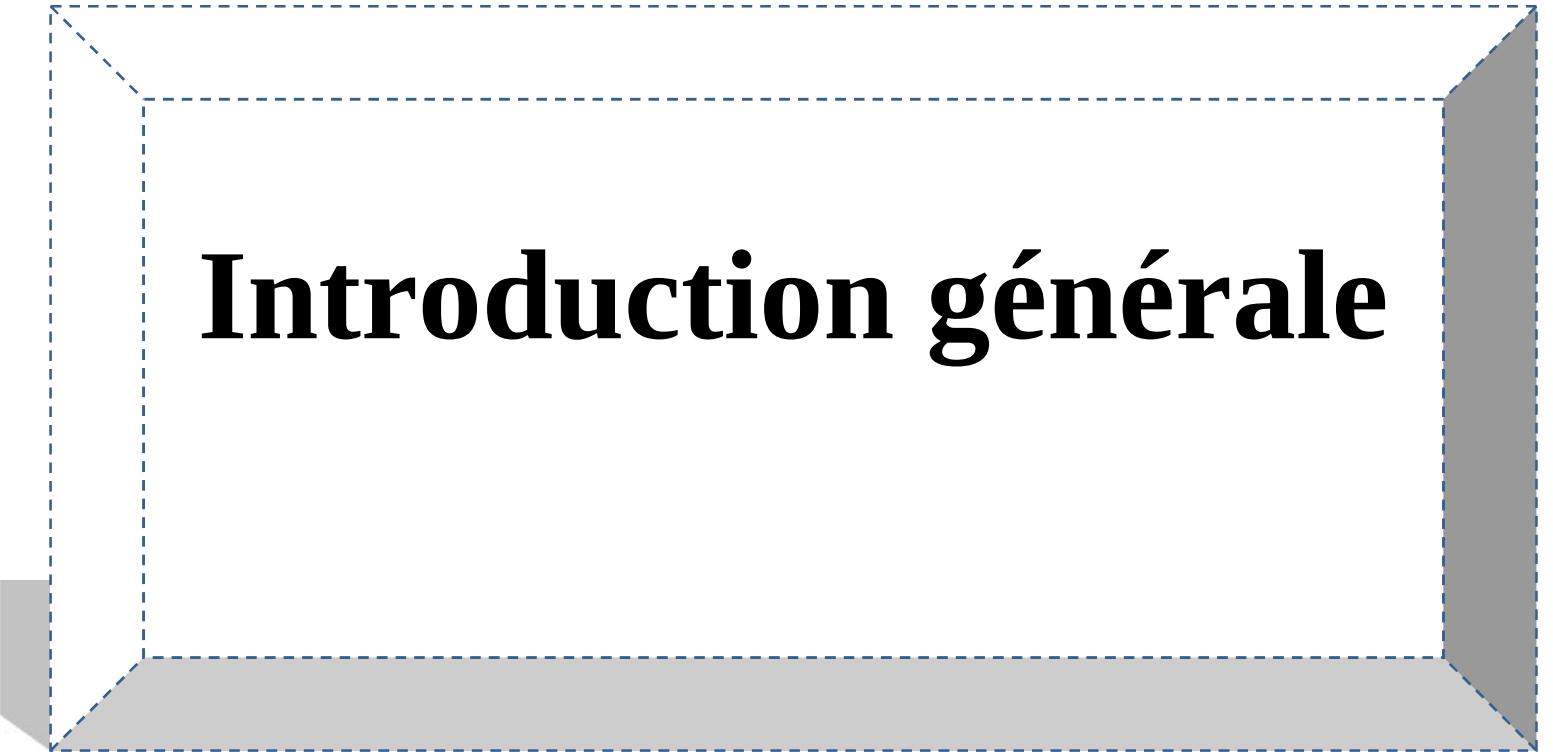
- W_{ma} : Humidité absolue dans l'air.
- W_z : Poids de la vapeur d'atomisation / Poids du combustible.
- W_a : Poids de l'air sec à l'entrée / Poids du combustible.
- W_{ma} : Humidité absolue dans l'air.
- W_a : Poids d'air sec à l'entrée / Poids du combustible.

Abréviations :

- **BA** : Bornes alternateur.
- **BP** : Basse pression.
- **BU** : Bornes usine.
- **DE** : Désurchauffeur.
- **FOD** : Fuel oil domestique.
- **HP** : Haute pression.
- **HT** : Haute température.
- **MP** : Moyenne pression.
- **MT** : Moyenne température.
- **RA** : Circuit de vapeur vive.
- **RQ** : Circuit de vapeur auxiliaire.
- **RA20** : Conduite de vapeur vive.
- **RQ30** : Conduite de vapeur auxiliaire.
- **R** : La richesse d'un mélange.
- **SG** : Circuit de vapeur de barrage.
- **S** : Surchauffeur.

Lettres grecques :

- η_{RA} : Rendement du moteur électrique du réchauffeur d'air.
- η_{VR} : Rendement du moteur électrique du ventilateur de recirculation des fumées.
- η_G : Rendement total du générateur de vapeur par la méthode indirecte.
- λ : Facteur d'air.
- $\cos \varphi$: Facteur de puissance nominal du moteur.



Introduction générale

Introduction générale

Le début de ce troisième millénaire, est déjà caractérisé par une course sans précédent pour le contrôle des ressources énergétiques, car l'énergie est la pierre angulaire de tout développement économique.

L'Algérie qui est un pays en voie de développement, et en croissance économique ne doit pas déroger à cette règle, il faut donc rationaliser la production des énergies fossiles, diversifier nos ressources énergétiques et améliorer nos installations de production d'énergie.

L'électricité est perçue comme l'une des énergies les plus demandées et les plus propres. Dans notre pays, elle est produite dans des centrales électriques, soit des centrales à gaz, soit des centrales à vapeur ou bien des centrales mixtes (gaz-vapeur).

Ces trois types de centrales utilisent toutes des combustibles fossiles d'où la nécessité de contrôler et d'améliorer leur rendement énergétique afin d'économiser la consommation de ces énergies non renouvelables.

Le générateur de vapeur est l'un des éléments les plus importants dans une centrale électrique, d'où l'importance de contrôler son efficacité et de veiller constamment à l'améliorer.

Le présent travail porte sur une étude comparative du rendement du générateur de vapeur du groupe N°01 de la centrale de Cap Djinet et cela avant et après la révision générale faite en 2015.

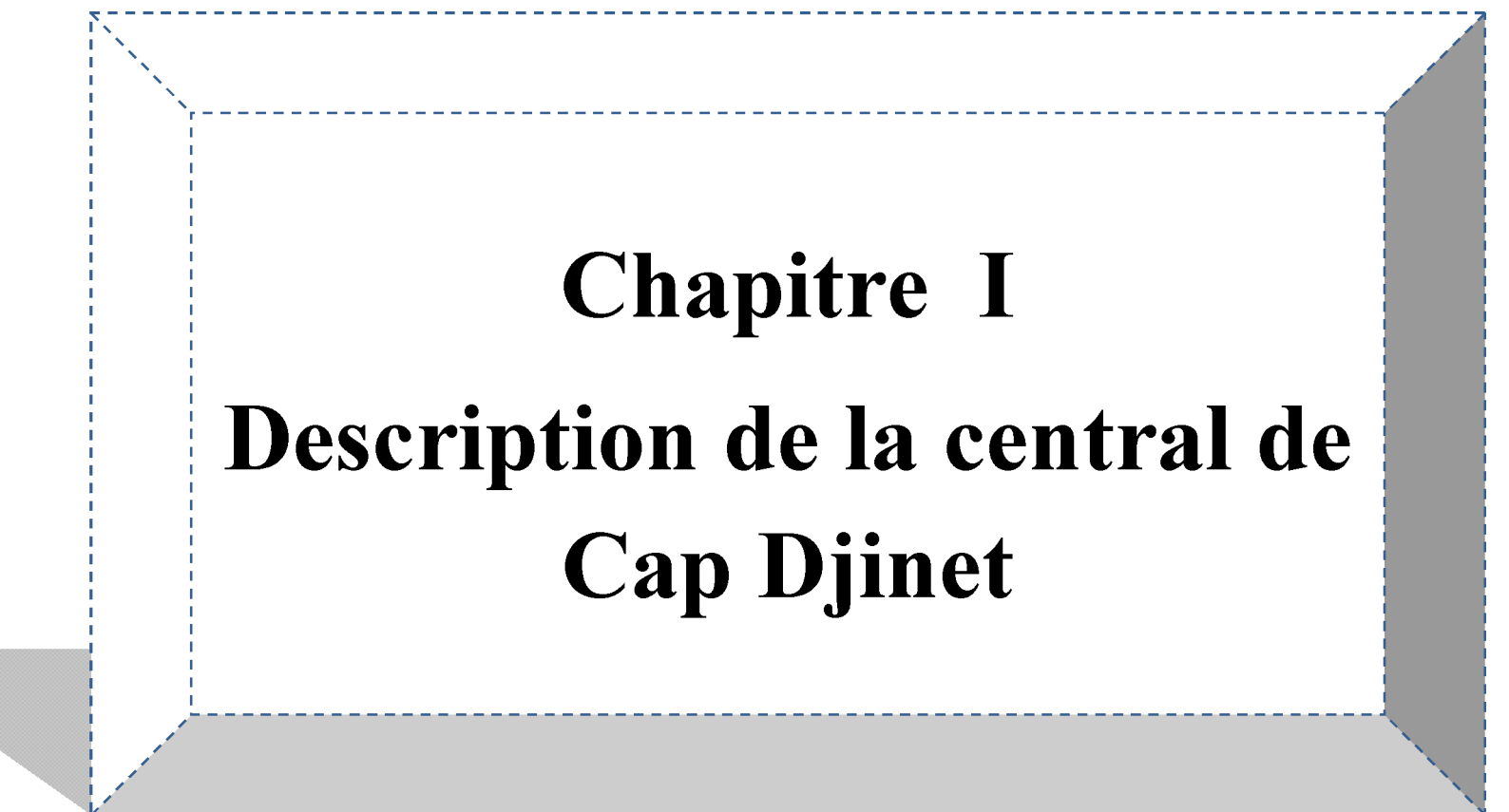
Pour ce faire, nous allons calculer le rendement de la chaudière pour l'année 2016 et nous allons le comparer à celui de l'année 2012 déjà calculé.

Pour mener à bien notre travail, nous avons subdivisé ce manuscrit en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré aux généralités et à la présentation de la centrale de Cap Djinet.

Le second se partage en deux parties, la première est réservée à la description du générateur de vapeur et la deuxième partie à une introduction au phénomène de la combustion.

Le troisième et dernier chapitre porte sur le calcul du rendement du générateur de vapeur de la centrale de Cap Djinet ; pour cela nous l'avons divisé en trois parties : La première étant consacré au calcul du rendement du générateur de vapeur par la méthode indirecte, la deuxième partie portant sur le calcul du rendement du générateur de vapeur par la méthode directe et dans la troisième et dernière partie nous allons faire une interprétation des résultats obtenus et nous terminerons par une conclusion.



Chapitre I

Description de la central de Cap Djinet

I. Introduction

Les groupes Turboalternateurs sont des machines à grande puissance, destinés à la production de l'énergie électrique nécessaire à la vie quotidienne et au développement industriel. La puissance unitaire des groupes générateurs, la structure des réseaux et des centrales, ont considérablement évolué depuis les débuts de l'électrification. Dans chaque pays ces facteurs dépendent des ressources locales et l'état de développement du pays.

En Algérie, les centrales thermiques à vapeur sont construites généralement en bord de mer à cause du déficit que connaît le pays en ressources hydrauliques ; notamment si la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie chimique n'est possible industriellement qu'en passant par les transformations suivantes :

- Transformation d'énergie chimique en énergie calorifique.
- Transformation d'énergie calorifique en énergie mécanique.
- Transformation d'énergie mécanique en énergie électrique.

II. Présentation de la centrale de Cap-Djinet

II.1. Localisation et historique de la centrale [1]

La centrale thermoélectrique de Cap-Djinet est située en bord de mer à l'Est d'Alger, dans la wilaya de Boumerdès. Elle s'étend sur une superficie de 35 hectares.

Le choix du site revient :

- A la proximité des consommateurs importants, situés notamment dans la zone industrielle Rouiba-Reghaia.
- A la possibilité d'extension.
- Aux conditions du sous-sol favorables, ne nécessitant pas de fondations profondes.
- A la proximité de la mer vu les besoins en eau pour le refroidissement et l'alimentation.

La Centrale de Ras-Djinet se compose de 4 tranches de type thermique vapeur d'une puissance unitaire de 176 MW aux Bornes de l'alternateur (BA).

La puissance totale installée est de 704 MW (BA), la puissance fournie au réseau est de 672 MW aux bornes de l'usine (BU).

La consommation totale des auxiliaires des 4 tranches et des auxiliaires communs est d'environ 32 MW.

La centrale a été construite par un consortium Austro-Allemand : SIEMENS-KWU-SGP

La mise en service des groupes s'est effectuée comme suit :

- Groupe 1 : couplage sur réseau le 17/06/1986.
- Groupe 2 : couplage sur réseau le 17/09/1986.
- Groupe 3 : couplage sur réseau le 29/11/1986.
- Groupe 4 : couplage sur réseau le 21/02/1987.

II.2.Caractéristiques techniques de la centrale

II.2.1.Combustibles

Le combustible utilisé pour les chaudières est le gaz naturel de HassiR'mel acheminé par gazoduc avec un débit de $160\,000\text{ m}^3/\text{h}$ afin d'assurer la pleine charge des quatre groupes. En cas d'indisponibilité du poste gaz, le secours est assuré par du fuel oil domestique (FOD) fourni par NAFTAL. Il est stocké dans deux réservoirs de $10\,000\text{ m}^3$ chacun.[1]

La consommation nominale par groupe est de :

- En marche au gaz : $Q = 40\,000\text{ m}^3/\text{h}$.
- En marche au fuel : $Q = 42\text{ m}^3/\text{h}$.

II.2.2 .Générateurs de vapeur (chaudières)

Les générateurs de vapeur sont de type à circulation naturelle avec chambres de combustion pressurisées et resurchauffe, ils ont pour rôle de transformer l'eau en vapeur à haute pression.

➤ Constitution

- Chambre de combustion formée par les tubes écrans.
- Un ballon (réservoir) et un économiseur.
- Trois surchauffeurs et deux resurchauffeurs.
- Trois désurchauffeurs par injection d'eau pour la régulation de la température de vapeur.
- Quatre colonnes de descentes.
- Huit brûleurs de combustion mixte gaz/fuel.
- Deux ventilateurs de recyclage.
- Deux ventilateurs de soufflage.
- Deux préchauffeurs d'air à vapeur, servant à l'augmentation de la température de l'air de combustion avant le réchauffeur rotatif.
- Un réchauffeur rotatif d'air.

II.2.3.Turbines

Les turbines sont à condensation et à soutirages. Elles sont composées de trois corps : haute pression (HP), moyenne pression (MP) et basse pression (BP). Six soutirages alimentent trois réchauffeurs BP, deux réchauffeurs HP et le dégazeur bâche alimentaire.

Les turbines ont pour rôle de transformer l'énergie thermique contenue dans la vapeur provenant de la chaudière en un mouvement rotatif de l'arbre. Le travail mécanique obtenu sert à entraîner l'alternateur.

II.2.4.Eau de réfrigération (eau de mer)

La prise d'eau se situe en mer à 900 m de la station de pompage et de filtration. L'eau arrive par trois conduites d'amenée d'eau de mer, en béton de 3m de diamètre.

Après la traversée du condenseur, l'eau de réfrigération est rejetée à la mer au moyen d'un canal de rejet.

II.2.5.Poste d'eau

Le poste d'eau est l'ensemble des équipements qui préchauffe l'eau et la transfère du condenseur jusqu'à la chaudière en passant par la bache alimentaire (dégazeur). Il est constitué du condenseur, de deux pompes d'extraction et de trois pompes alimentaires.

II.2.6.Alternateurs

Les alternateurs sont à refroidissement à l'hydrogène sous pression de 3 bars en circuit fermé, l'hydrogène étant lui-même refroidi à l'eau d'extraction.

Tableau I.1 : paramètres de l'alternateur

Paramètres	Valeurs	Unités
Tension nominale	15.5	KV
Puissance apparente	220	KVA
Puissance active	176	MW

II.2.7.Evacuation de l'énergie

L'énergie électrique produite par chaque tranche est évacuée par l'intermédiaire de lignes 225 KV vers le poste Alger-Est (Boudouaou).

II.2.8.Dessalement de l'eau de mer

La station de dessalement de la centrale contient quatre unités de dessalement produisant

500 m³/j chacune, assurant la production en eau dessalée, stockée dans deux baches de 2700 m³ chacune.

II.2.9.Station de déminéralisation

Deux chaînes de déminéralisation de 40 m³/h chacune, parachèvent le traitement de l'eau avant son utilisation dans le cycle eau-vapeur. Le stockage d'eau déminéralisée se fait dans deux réservoirs de 1500 m³ chacun.

II.2.10.station d'électrochloration

La chloration de l'eau de mer permet de protéger le circuit d'eau de mer contre tout encrassement pouvant être causé par les micro-organismes marins qui se prolifèrent.

Elle se fait par injection d'hypochlorite de sodium. L'installation est prévue pour produire 150 kg/h de chlore par unité.

II.2.11.Auxiliaires communs aux quatre tranches

- Une station de production d'hydrogène : Sert à produire l'hydrogène nécessaire au refroidissement des quatre alternateurs de la centrale.
- Un poste de détente gaz : Il est composé de deux lignes de filtration du gaz, et trois lignes de régulation pour la détente du gaz de 60 à 6 bars.
- Un poste de dépotage et transfert fuel : Deux bâches de 10000 m³ chacune servent de stockage du fuel.

II.2.12.Commande et contrôle

La centrale de Cap-Djinet se caractérise par un degré élevé d'automatisme et de centralisation des commandes. On dénombre une quarantaine de chaînes de régulation par groupe de production qui permettent un pilotage automatique du groupe.

Les systèmes les plus caractéristiques sont :

- Commande par système électronique
- Commande par système de régulation électronique et électrohydraulique
- Système de surveillance électronique

II.2.13.Salles de commandes centralisées

Il y'a deux salles de commande, chacune assure le contrôle et la régulation d'une paire de tranche.

II.3.Fonctionnement et caractéristiques d'une tranche de production d'énergie

Afin de produire de l'énergie électrique trois transformations principales sont nécessaires :

- Transformation de l'énergie chimique en énergie calorifique.
- Transformation de l'énergie calorifique en énergie mécanique.
- Transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Pour la réalisation de ces transformations il nous faut de l'eau comme véhicule d'énergie.

Voici ci-dessous un schéma d'une centrale thermique à vapeur qui nous montre le principe de fonctionnement d'une tranche de production

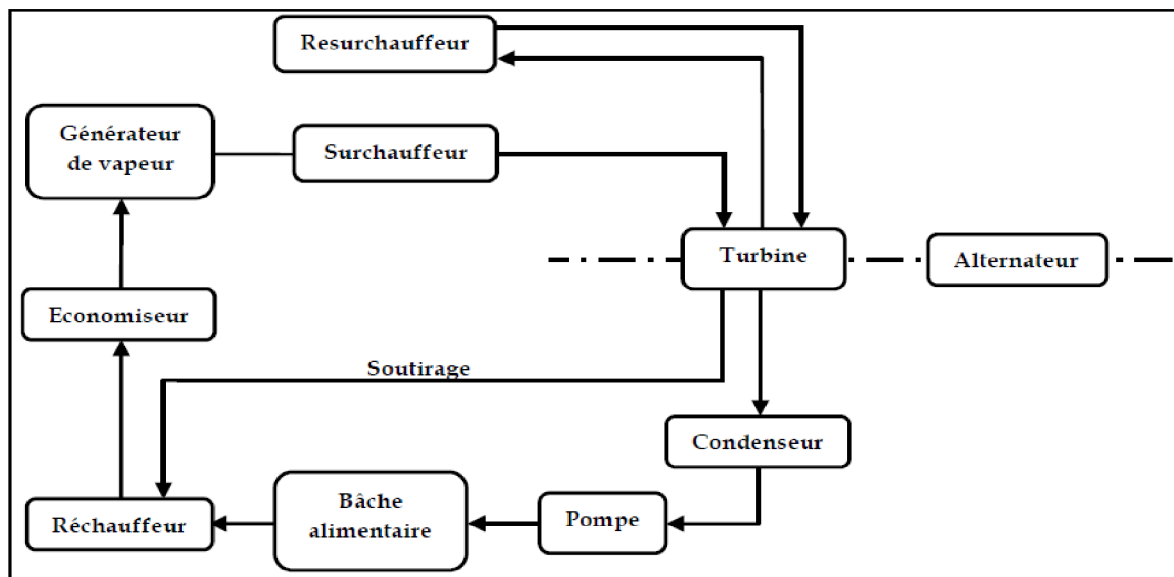


Figure I.1 : Schéma simplifié d'une centrale thermique à vapeur. [2]

II.3.1. Caractéristiques des différents composants d'une tranche de production

II.3.1.1 .La chaudière

Afin de décrire la chaudière nous allons lui consacrer tout un chapitre vu que notre étude sera portée sur celle-ci.

II.3.1.2. La turbine

La turbine est du type à condensation à simple resurchauffe, elle a une seule ligne d'arbre composée de trois corps : HP, MP et BP séparés.

Le corps HP est à simple flux et les corps MP et BP sont à double flux. Les rotors de la turbine et de l'alternateur sont accouplés rigidement. Le corps HP est équipé d'un étage de réglage pour régulation par groupes de tuyères.

La vapeur resurchauffée est admise au corps MP par l'intermédiaire de deux ensembles combinés vanne d'interception – soupape modératrice.

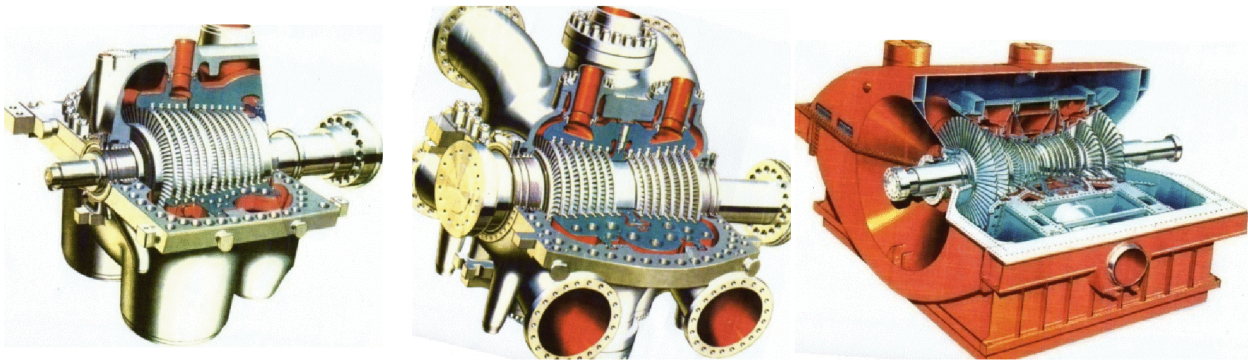
Des gaines de liaisons relient le corps MP au corps BP et Six soutirages sont prévus en plusieurs endroits de la turbine.

➤ Paramètres de la turbine à la puissance nominale :

- Puissance aux bornes de l'alternateur : 176 MW
- Vitesse de rotation : 3000 tr/min

Tableau I.2 : Paramètres de la vapeur au niveau de la turbine

	Débit vapeur [t/h]	Pression vapeur [bars]	Température vapeur [°C]
Admission au corps HP	523.2	138.20	535.0
Admission au corps MP	467.9	35.90	535.0
Admission au corps BP	406.5	5.530	282.2
Echappement vers condenseur	353.7	0.050	32.9

**Figure I.2** : Les trois corps de la turbine HP, MP et BP. [3]**Tableau I.3** : Paramètres des soutirages

	Débit vapeur [kg/s]	Pression [bars]	Température [°C]
Soutirage A ₁	2.405	0.1665	56.2
Soutirage A ₂	6.460	0.6695	88.2
Soutirage A ₃	5.987	1.8615	113.2
Soutirage A ₄	7.336	5.5287	282.2
Soutirage A ₅	10.012	16.5080	423.7
Soutirage A ₆	13.674	40.0000	367.2

II.3.1.3. Condenseur

C'est un condenseur par surface dont le rôle est de :

- Assurer la condensation de la vapeur qui s'échappe du corps BP de la turbine.
- Réintroduire le condensat dans le circuit eau-vapeur.
- Augmenter la chute d'enthalpie de la turbine en établissant une dépression atmosphérique dans le but d'avoir un rendement élevé.
- Dégazer le condensat et évacuer les incondensables.

Le condenseur reçoit aussi le condensat des réchauffeurs, différentes purges ainsi que la vapeur de contournement.

Tableau I.4 : paramètres du condenseur

Paramètres	Valeurs	Unités
Surface d'échange	10101	m ²
Diamètre extérieur des tubes	19	mm
Epaisseur de la paroi des tubes	0.7	mm
Vitesse de l'eau dans les tubes à l'échauffement nominal	1.8	m/s
Vitesse maximale admissible de l'eau dans les tubes	2.5	m/s

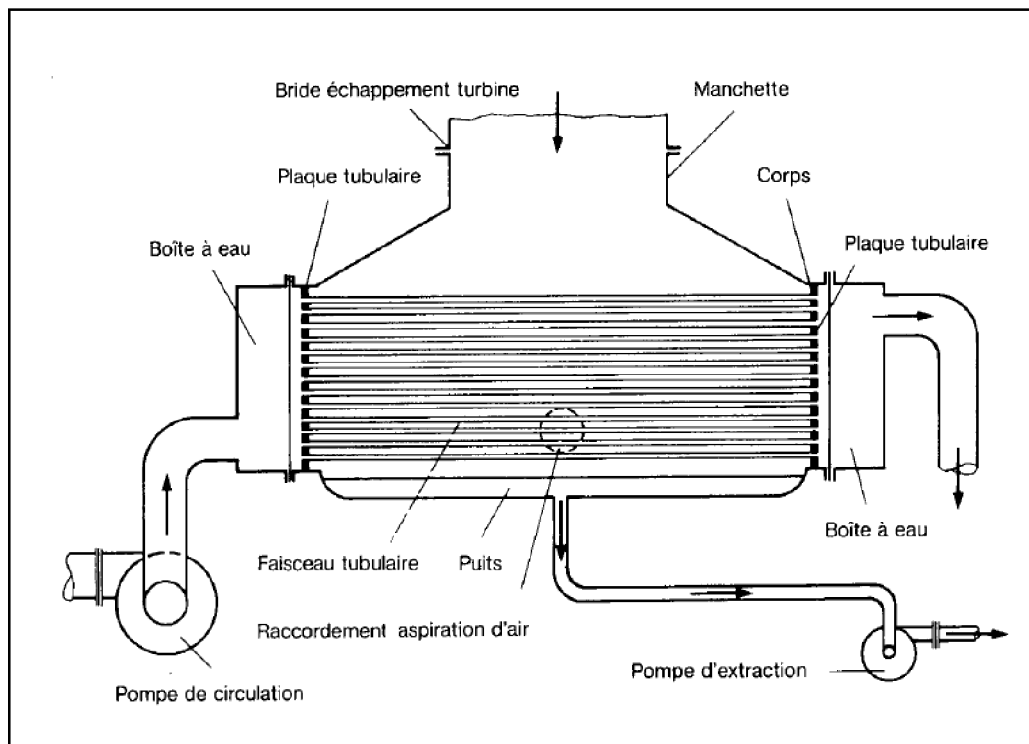


Figure I.3 : constitution générale d'un condenseur par surface.

II.3.1.4. Bâche alimentaire

C'est un réservoir cylindrique combiné avec un dégazeur, il reçoit l'eau en provenance de la pompe d'extraction, eau qui a traversé un certain nombre de réchauffeurs. Il reçoit également la vapeur provenant du soutirage A₄ de la turbine et le condensat auxiliaire des réchauffeurs HP.

L'eau se réchauffe alors jusqu'à la température de saturation correspondant à la pression du soutirage en condensant la vapeur qui est prélevée à la turbine.

Il joue donc à la fois le rôle d'un réchauffeur et il conditionne la pression à l'aspiration de la pompe alimentaire.

II.3.1.5. Pompes

A. Pompes d'extraction

Les pompes d'extraction permettent d'extraire l'eau provenant de la vapeur condensée au niveau du condenseur et la refoulent dans le dégazeur bâche alimentaire. Les pompes sont de type centrifuges à quatre étages afin d'obtenir une pression suffisante lors du refoulement.

Tableau I.5 : Paramètres de la pompe d'extraction

Paramètres	Valeurs	Unités
Débit nominal	413.96	m ³ /h
Vitesse de rotation	1479	tr/min
Hauteur totale	171.77	m
Hauteur à débit nul	202	m

B. Pompes alimentaires

Elles sont au nombre de trois. Elles aspirent l'eau de la bâche alimentaire et la refoulent dans le réservoir de la chaudière.

Les pompes alimentaires aspirent de l'eau chaude et la refoulent à une pression élevée et un débit important ce qui permet de maintenir le niveau d'eau dans le réservoir de la chaudière dans un seuil bien déterminé.

C. Pompe nourricière

Elle est utilisée afin d'obtenir une pression suffisante à l'entrée de la pompe alimentaire, ce qui permet de compenser la hauteur de charge insuffisante de l'eau dans la bâche alimentaire.

II.3.1.6. Condenseur de buées

Son rôle est de récupérer la vapeur de fuite qui est un mélange de buées et d'air venant des garnitures d'étanchéité. Les buées se condensent à la surface des tubes d'admission et le

condensat formé est évacué par un purgeur au condenseur de la turbine et l'air est évacué vers l'atmosphère par la soufflante d'extraction.

II.3.1.7.Éjecteurs d'air à vapeur

Leurs rôle est d'extraire les incondensables afin d'augmenter le vide.

Il existe deux éjecteurs de démarrage et deux éjecteurs de service.les éjecteurs de démarrage aident à créer le vide au niveau du condenseur pendant le démarrage et les éjecteurs de service maintiennent le vide pendant le service. La vapeur d'alimentation des éjecteurs provient du circuit de vapeur auxiliaire.

Chaque éjecteur de service est composé de deux étages, dans le premier étage un mélange de gaz et de vapeur du condenseur de la turbine est extrait et est comprimé, dans le deuxième étage du gaz du condenseur intermédiaire est aspiré, il est comprimé à la pression atmosphérique et est rejeté vers l'atmosphère par l'intermédiaire du condenseur final.

II.3.1.8.Réchauffeurs

A. Réchauffeurs basse pression

Leur rôle est de réchauffer le condensat principal lors de son transfert dans la bache alimentaire. Ils sont au nombre de trois et sont alimentés par les soutirages A_1, A_2, A_3 du corps BP de la turbine.

Tableau I.6 : paramètres des réchauffeurs basse pression

	Côté tube				Côté enveloppe			
	Timbre [bars]	Température de timbrage [°C]	Fluide	Capacité [l]	Timbre [bars]	Température de timbrage [°C]	Fluide	Capacité [l]
Réchauffeur BP ₁	24	135	Condensat principal	1400	2	160	Vapeur condensée	9000
Réchauffeur BP ₂	24	135	Condensat principal	1700	2	150	Vapeur condensée	4900
Réchauffeur BP ₃	24	160	Condensat principal	1400	5	200	Vapeur condensée	3600

B. Réchauffeurs haute pression

Leur rôle est de réchauffer l'eau d'alimentation lors de son acheminement vers la chaudière. Ils sont au nombre de deux et sont alimentés par les soutirages A_5, A_6 du corps haute-pression de la turbine.

Tableau I.7 : paramètres des réchauffeurs haute pression

	Côté tube				Côté enveloppe			
	Timbre [bars]	Température de timbrage [°C]	Fluide	Capacité [l]	Timbre [bars]	Température de timbrage [°C]	Fluide	Capacité [l]
Réchauffeur HP₅	235	230	Eau d'alimentation	2716	22.55	460	Vapeur condensée	6363
Réchauffeur HP₆	235	280	Eau d'alimentation	2791	49.03	400	Vapeur condensée	6376

II.4. Les circuits principaux constituant la centrale de cap djinet

II.4.1. Circuit des combustibles

Le gaz naturel parvient à la station de détente par pipe enterrée. Quatre tubes distribuent ce gaz aux chaudières de chaque tranche. Le fuel ne doit servir que de secours. Sa distribution s'effectue de la même manière que le gaz naturel.

II.4.2. Circuit d'air de combustion

L'air est prélevé dans l'atmosphère et mis en vitesse par les ventilateurs ; il est d'abord réchauffé aux environs de 315°C par la vapeur auxiliaire dans le réchauffeur d'air à vapeur puis par les gaz de combustion dans le réchauffeur d'air rotatif.

Cet air est conduit aux brûleurs en fournissant la quantité d'oxygène nécessaire à la combustion.

II.4.3. Circuit de gaz de combustion

Ce circuit résulte de la réunion des deux circuits précédents à partir de la sortie des brûleurs.

Il est tracé de telle sorte que, d'une part, les gaz brûlés trouvent continuellement des parois à chauffer afin qu'il y ait des échanges thermiques et que, d'autre part, le fluide se trouvant derrière la paroi ait des besoins décroissant en chaleur au fur et à mesure que les fumées se refroidissent.

Aussitôt après la combustion, les gaz chauffent d'abord les parois qui entourent complètement la chambre de combustion, puis le deuxième surchauffeur à moyenne température (MT) et en parallèle le troisième surchauffeur à haute température (HT) et le resurchauffeur secondaire.

Les gaz pénètrent du surchauffeur primaire où ils fournissent de la chaleur au premier faisceau surchauffeur.

Bien que fortement refroidies, les fumées sont encore à près de 500°C, elles peuvent donc fournir un supplément de chaleur à l'eau comprimée dans l'économiseur, mais aussi à l'air de combustion dans le réchauffeur d'air rotatif.

Une partie de ces fumées est recyclée Afin de régler la température de la vapeur resurchauffée.

II.4.4. Circuit d'eau et de vapeur

C'est le circuit principal. L'eau froide est prise à la bêche alimentaire, elle est comprimée successivement par les pompes BP et HP et réchauffée par les réchauffeurs BP et HP au moyen de la vapeur soutirée. Elle passe alors à l'économiseur où sa température sera élevée par les gaz de combustion avant son introduction dans la chaudière.

Au début de la transformation l'eau était à 33°C et 0,05 bars absolus, à la fin elle est à 285°C et 160 bars.

Dans la chaudière, l'eau chaude comprimée arrive au réservoir supérieur et parcourt les parois tubulaires qui tapissent la chambre de combustion. Les gaz de combustion qui sont à 1300°C fournissent à l'eau la chaleur nécessaire à l'ébullition puis à la vaporisation.

De la vapeur saturée humide est recueillie au niveau de la partie supérieure de réservoir, celle-ci se sèche en passant par des faisceaux tubulaires.

La pression ne change pas mais la température atteint son maximum de 540°C.

La vapeur surchauffée arrive à la partie haute pression où elle se refroidie jusqu'à 357°C et se détend à 40 bars. La vapeur fournit donc un premier travail moteur puis retourne dans le foyer où elle circule dans le faisceau tubulaire de resurchauffe où la température atteint à nouveau 540°C. La vapeur revient à la turbine, se détend et se refroidie dans les corps MP et BP de la turbine en fournissant à nouveau un travail moteur.

La dernière transformation s'effectue au niveau du condenseur où la condensation de la vapeur s'effectue sous vide à 0,05 bars à la température de 33°C. L'eau ayant refroidie recommence un nouveau cycle.

Le circuit eau-vapeur comprend essentiellement les circuits suivants :

II.4.4.1. Circuit de vapeur vive (RA)

Ce circuit englobe la conduite de vapeur vive à la sortie de la chaudière à travers les vannes de vapeur vive jusqu'à la vanne d'arrêt de la turbine, avec un raccordement au poste de contournement haute pression, ainsi que la conduite de sureté et le système de purge.

A la sortie de la chaudière au niveau du surchauffeur partent deux conduites de vapeur vive RA11 et RA12, et du collecteur de sortie de la chaudière part seulement la conduite de vapeur vive principale RA20 qui mène au distributeur à l'entrée du corps haute pression de la turbine.

Lors de la mise en marche de la chaudière, le passage de la vapeur dans la turbine est bloqué par la soupape de vapeur principale. la vapeur produite passe par les postes de détente contournement haute pression jusqu'au côté froid du resurchauffeur. Ce cycle de la vapeur est nécessaire afin d'assurer la circulation naturelle dans les conduites de chaudière pendant que la conduite de vapeur vive est bloquée.

Après qu'une pression adéquate ait été atteinte dans la chaudière, la conduite de vapeur vive RA20 va être ouverte afin de réchauffer conduite et robinetterie.

II.4.4.2. Circuit de vapeur de barrage (SG)

Des fuites de vapeur surviennent au niveau des garnitures d'étanchéité d'arbre des corps HP et MP. Afin d'éviter toute introduction d'air dans la turbine des mesures doivent être prise au niveau des garnitures d'étanchéité du corps MP.

Le rôle du circuit SG est de mettre à profit cette vapeur de fuite ou de l'évacuer au condenseur de la turbine de sorte à éviter les pertes d'énergie et de condensat.

II.4.4.3. Circuit de vapeur auxiliaire (RQ)

En marche normale le système de vapeur est alimenté par une conduite raccordée au soutirage A5 de la turbine.

De la ligne de vapeur auxiliaire part la conduite d'alimentation des éjecteurs.

La vapeur de barrage nécessaire à la turbine est prélevée par la conduite RQ31 sur la conduite d'alimentation RQ30.

L'alimentation des réchauffeurs d'air à vapeur se termine dans le premier réchauffeur basse pression. Ces réchauffeurs d'air ont pour rôle de chauffer l'air de combustion à une température bien déterminée afin d'assurer une bonne combustion.

II.4.5. Circuits d'eau de refroidissement

On distingue deux sortes de circuits :

➤ Circuit ouvert :

L'eau de réfrigération est prélevée dans la méditerranée à débit important et régulier. Elle refroidit les parois en contact avec le circuit eau-vapeur puis retourne à la mer à l'aide d'un déversoir.

➤ Circuit fermé :

Il y'a un circuit d'eau de refroidissement secondaire appelé NORIA qui sert à refroidir les paliers des pompes d'extraction, les différentes sortes d'huile, les compresseurs et les pompes.

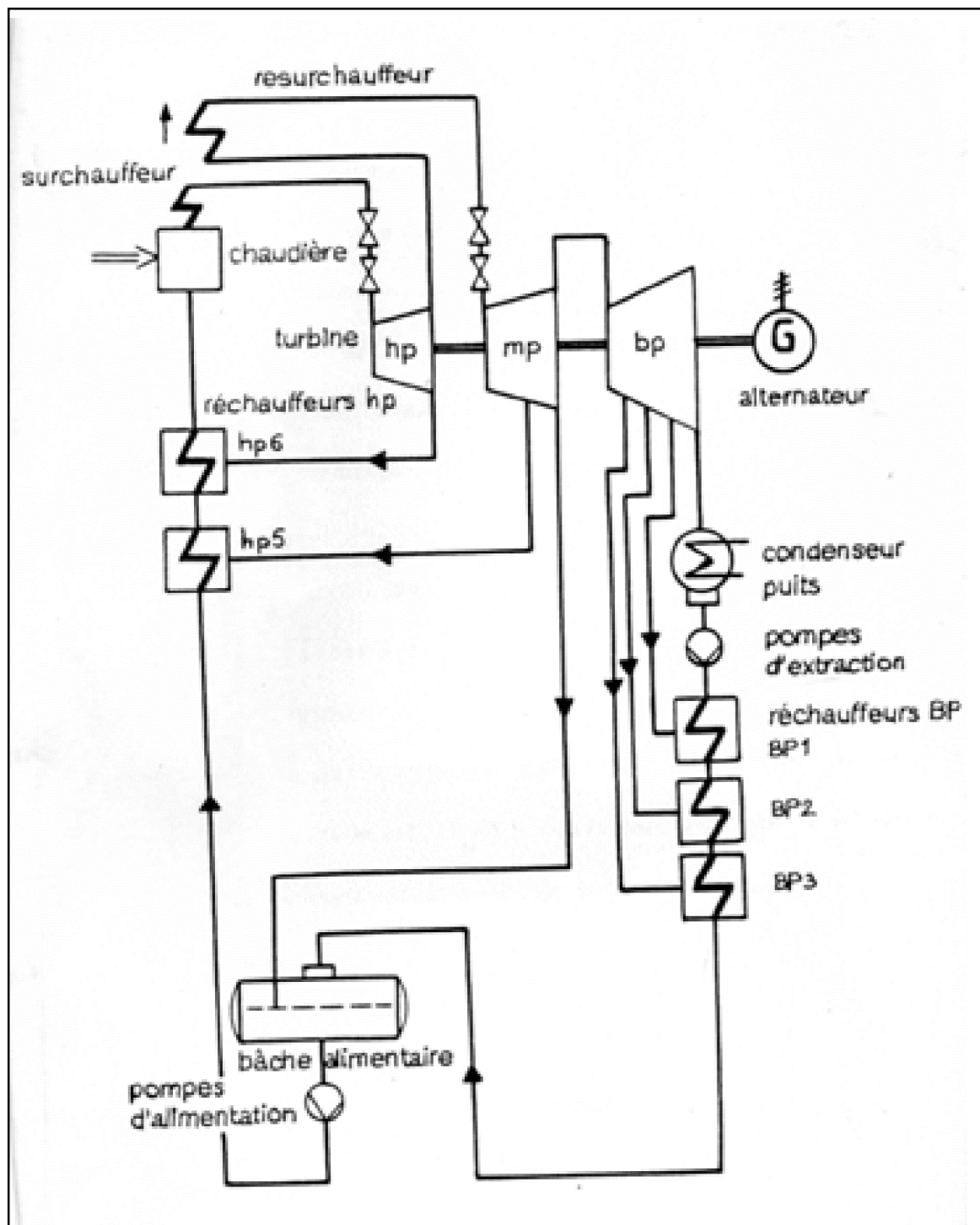


Figure I.4 : Circuit eau-vapeur simplifié.[4]

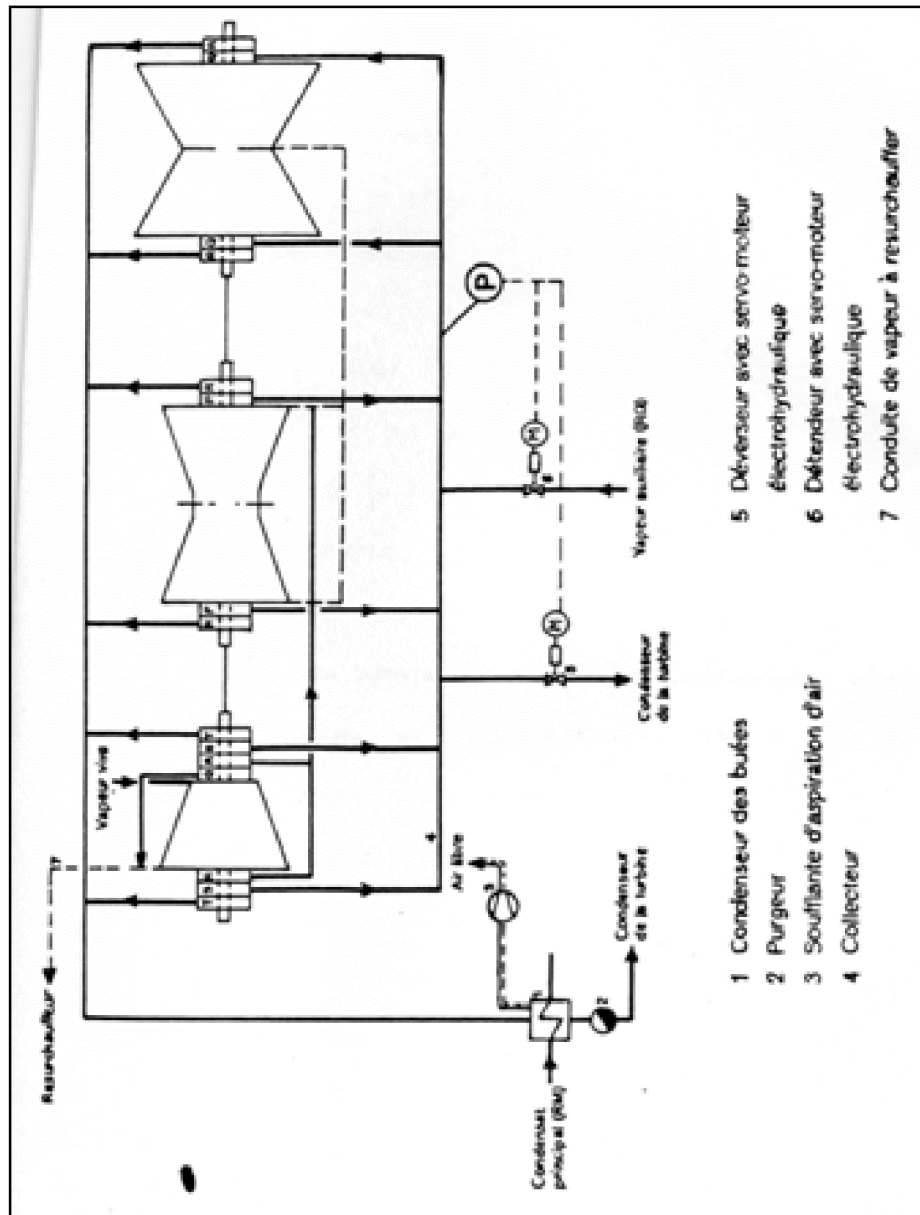


Figure I.5 : Circuit de vapeur de barrage.[5]

II.5. Cycle thermodynamique de la centrale de Cap Djinet

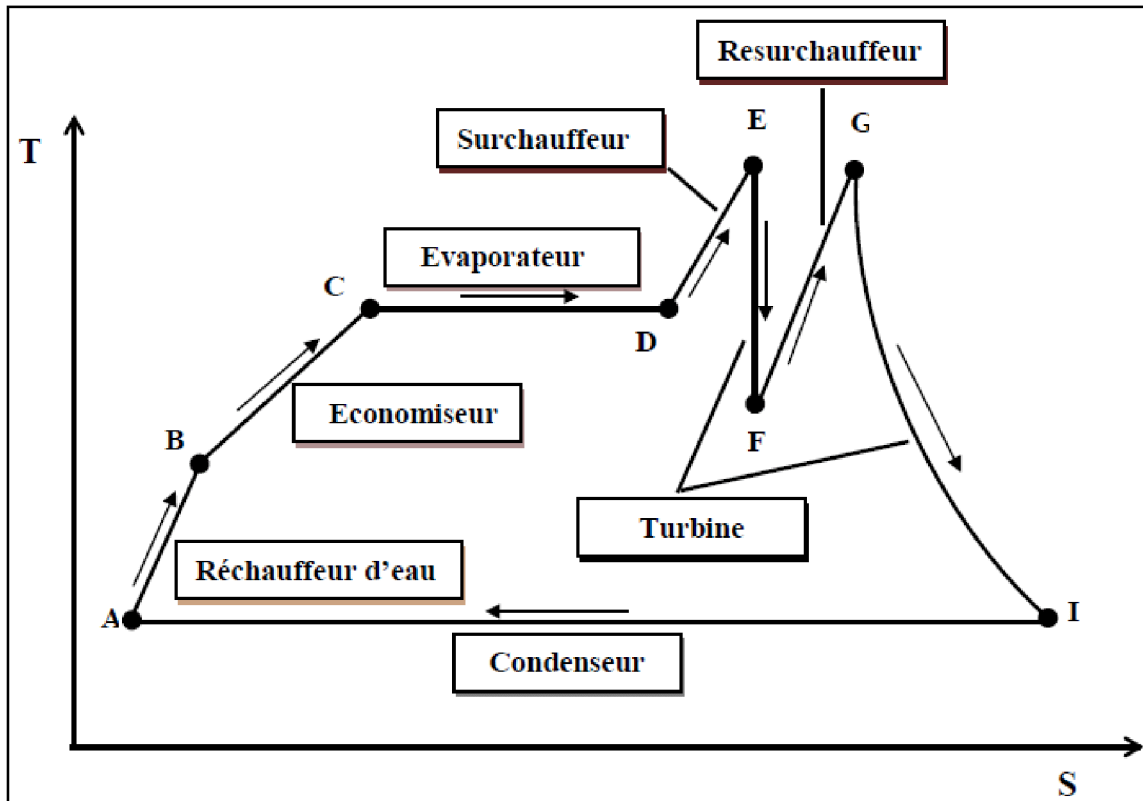


Figure I.6 : Cycle de Rankine d'une centrale thermique à vapeur. [2]

Sur la figure I.5, on décrit la température (T) du cycle théorique de l'eau-vapeur de la centrale thermique en fonction de l'entropie (S), (cette grandeur thermodynamique qui permet d'évaluer la dégradation de l'énergie du circuit eau-vapeur).

- L'eau d'alimentation est chauffée (tronçon **AB**) par la vapeur soutirée de la turbine, avec une élévation de pression.
- Dans la chaudière elle-même, la chaleur est utilisée pour préchauffer l'eau dans l'économiseur (tronçon **BC**) avant d'entrer en phase de vaporisation (Elévation de la température de l'eau jusqu'à saturation), on a ensuite une vaporisation à température constante (tronçon **CD**).
- : Surchauffe de la vapeur à pression constante.
- : Une première détente de la vapeur dans le corps **HP**.
- : Resurchauffe d'une partie de la vapeur à pression moyenne.
- : Une dernière détente (théoriquement, une entropie constante) dans les corps de la turbine à moyenne et basse pression (**MP** et **BP**).
- : Condensation à température constante.
- Le diagramme montre que l'énergie délivrée à la turbine est maximisée Si les points E et G sont à leurs valeurs maximales et le point I a sa valeur minimale.

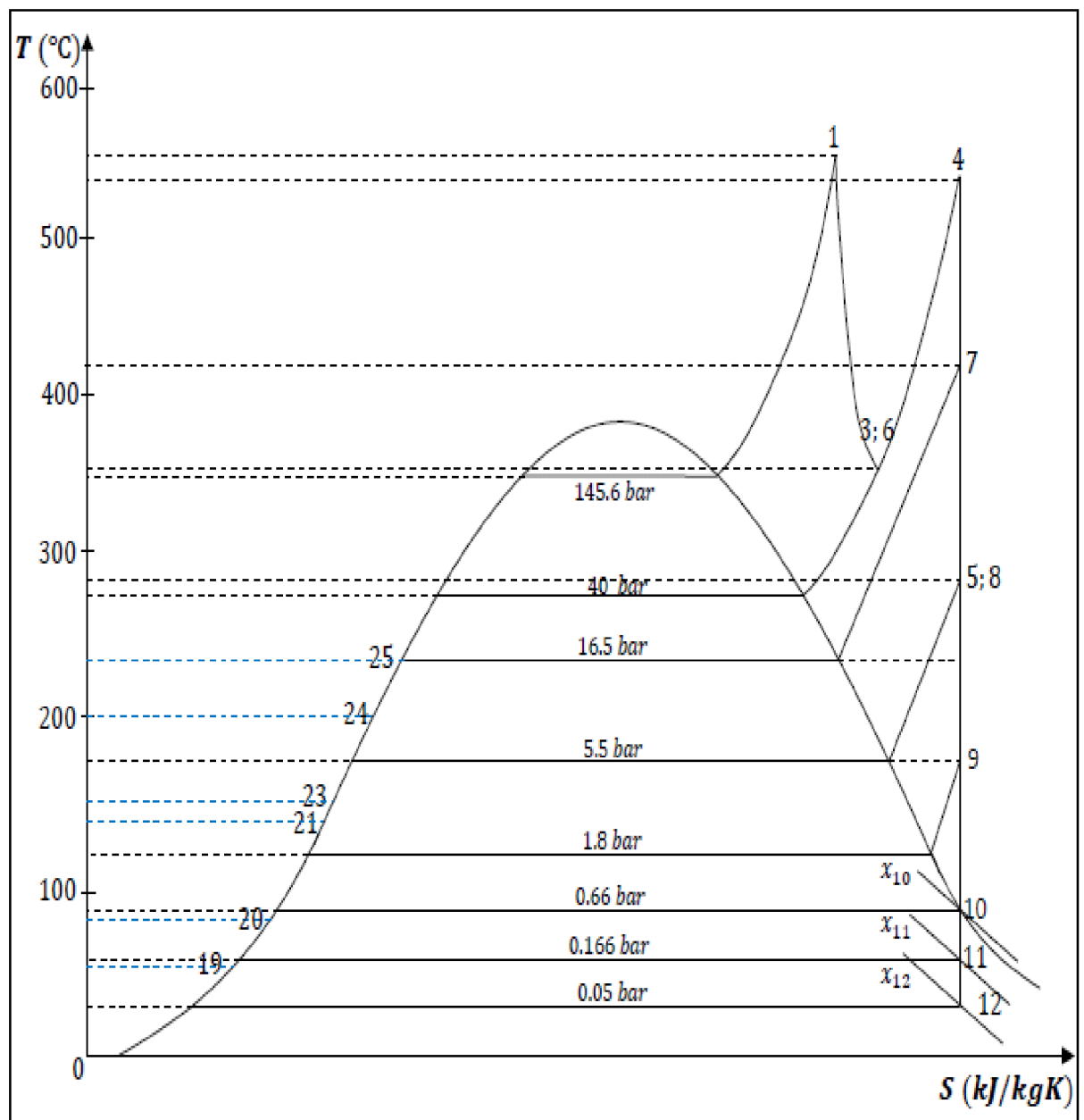
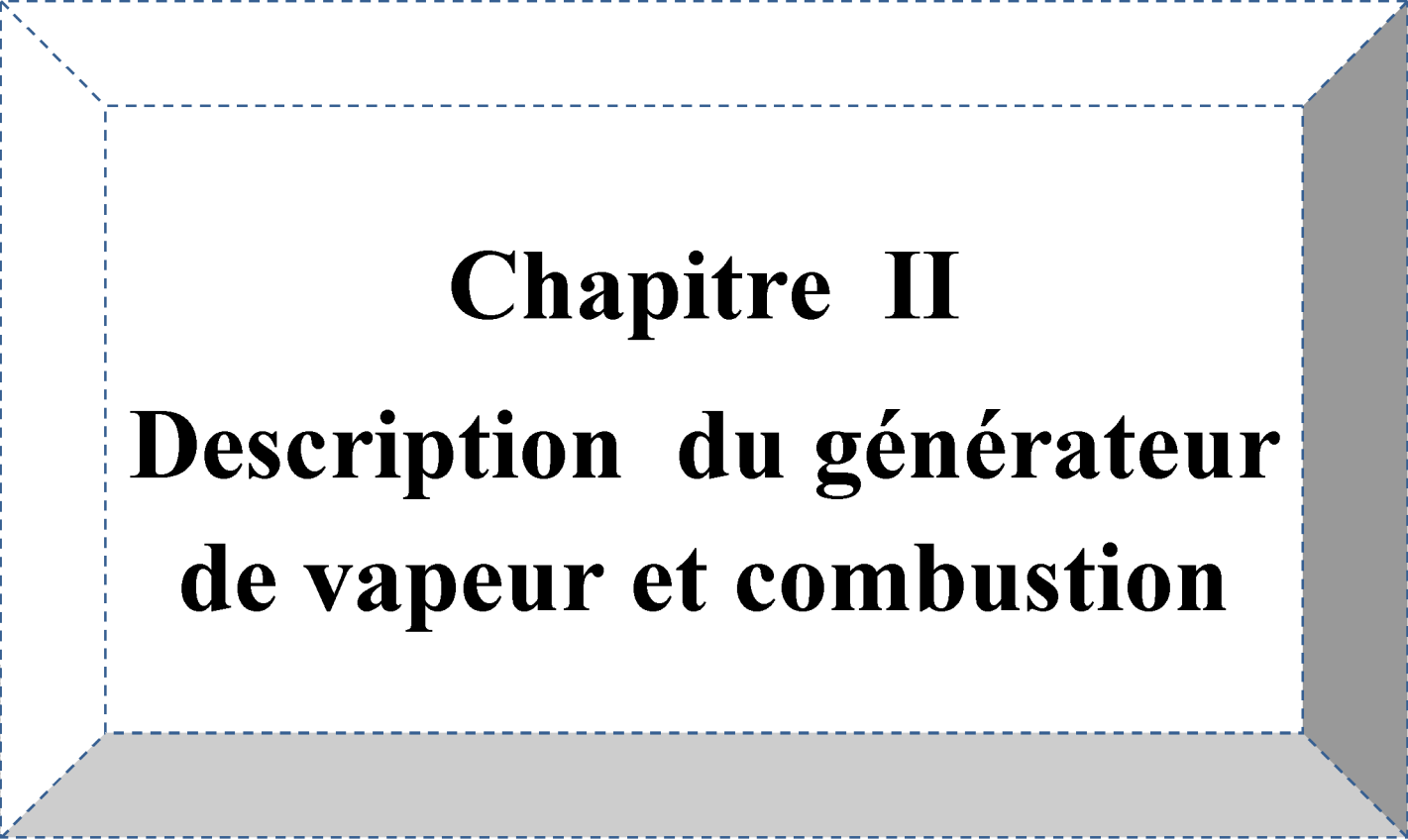


Figure I.7 : Evolution du fluide moteur dans le diagramme T-S de la centrale thermique de Cap Djinet.[2]



Chapitre II

Description du générateur de vapeur et combustion

II.1. Description et mode de fonctionnement du générateur de vapeur

II.1.1. Introduction

La vapeur d'eau est utilisée dans la production d'énergie et dans de nombreux procédés industriels. 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. Pour produire de la vapeur, il est nécessaire de chauffer l'eau à son point d'ébullition puis de fournir une quantité suffisante de chaleur pour changer l'eau bouillante en vapeur. Les techniques de production et d'utilisation de la vapeur font donc appel à d'importants aspects de la technologie de l'ingénierie. Le générateur de vapeur est l'un des moyens utilisés pour produire de la vapeur.

II.1.2. Historique

L'idée d'utiliser la vapeur comme force motrice remonte au 1^{er} siècle après JC avec l'invention de l'éolipile qu'est une sphère remplie d'eau chauffée à ébullition pour démontrer la force motrice de la vapeur et ceci par le mathématicien Grec Héron d'Alexandrie. La chaudière trouve alors son origine qui remonte à la plus haute antiquité.

En effet, depuis que l'homme a découvert le mode de vie qui consiste à faire bouillir ses aliments, il a ainsi amorcé la mise au point d'une chaudière. Mais il a fallu attendre jusqu'à la fin du 17^{ème} siècle pour voir apparaître la « Marmite de Papin », considérée comme la première véritable application industrielle de la chaudière. Elle fut ensuite très tôt suivie de la première tentative d'application de la force motrice de la vapeur à la navigation.

Une réalisation remarquable en France fut alors le fardier en 1769 mis au point par l'Ingénieur militaire CUGNOT ; il s'agit de la première machine à vapeur en rotation. Des améliorations successives, surtout à partir de 1828, vont conduire à la mise au point de la première chaudière tubulaire en Grande Bretagne. Mais auparavant, James Watt, qui fut l'un des premiers ingénieurs à parvenir aux propriétés thermodynamiques de la vapeur d'eau, va inciter à la perfection notamment avec la mise au point et l'application d'autres échangeurs de chaleurs tels que le surchauffeur et l'économiseur. Bien que ces types de systèmes montrent l'ingéniosité de leurs auteurs, Il a fallu attendre l'arrivée du monde industriel moderne, en particulier l'exploitation intensive des ressources énergétiques, le développement de l'industrie chimique pour accélérer les études théoriques et expérimentales sur les phénomènes d'écoulement diphasique et l'ébullition. Au XIX^e siècle, la chaudière comportait deux parties distinctes : le foyer et le bouilleur, le premier entièrement garni de réfractaires assurant la combustion (en général de charbon) et la production de chaleur, le second utilisant cette chaleur pour créer de la vapeur dans un récipient suffisamment étanche, capable de résister à la pression. Ensuite, l'imbrication progressive d'éléments ou de tubes vaporisateurs au dessus, puis autour du foyer, a permis d'obtenir des échanges de chaleur par rayonnement direct et de rendre plus compact cet ensemble, pour arriver, grâce aussi à l'adoption de construction en tube d'acier soudés bout à bout, à placer le foyer à l'intérieur de parois

vaporisatrices. Ces améliorations ont permis d'accroître la puissance unitaire des chaudières dont le nombre n'est plus imposé comme autrefois par une limite de capacité (batterie de chaudière dans un bateau ou dans une ancienne chaufferie).

A la même époque avec l'utilisation de la vapeur comme force motrice par l'intermédiaire de machines à pistons (fixes ou mobiles-locomotives) et de turbines à vapeur ce sont affinées les notions de thermodynamique et de recherche d'amélioration du rendement des cycles énergétiques ; c'est ainsi que sont apparues, comme éléments favorables, l'augmentation de la pression et l'utilisation de vapeur surchauffée en place de vapeur saturée.

Ces développements successifs ont contribué à rendre de plus en plus élaborée la conception des chaudières.

II.1.3. Définition et rôle d'un générateur de vapeur

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 (avec ou sans combustion) à de l'eau sous pression pour obtenir soit de l'eau surchauffée sous pression, soit de la vapeur ou un fluide à l'état supercritique devenant de la vapeur par détente. De plus, les chaudières à vapeur de grande puissance sont en général associées à une turbine à vapeur pour produire de l'énergie électrique.

Les sources de chaleur envisagées proviennent soit de la combustion de produits fossiles tels que charbon, pétrole, gaz naturel, soit de la combustion de sous-produits tels que fuel, gaz de raffinerie, de gazogènes, de four à cokes, soit de la combustion de déchets tels que bois, écorces, ordures ménagères ainsi que de liqueur noire intégrée dans un cycle de génération de produits utilisés dans les papeteries, soit encore des récupérations de chaleur pure en aval de turbines à gaz ou en aval de process chimiques.

II.1.4. Classification des générateurs de vapeur

Le générateur de vapeur est un dispositif permettant de chauffer l'eau et de produire de la vapeur. Les générateurs de vapeur peuvent être classés selon divers paramètres : de conception, du mode de circulation, du support et du mode d'emploi.

➤ Selon la conception :

Deux types de générateurs sont disponibles :

- Générateurs de vapeur à tubes de fumée.
- Générateurs de vapeur à tubes d'eau.

- **Générateurs de vapeur à tubes de fumée :**

Ce sont des générateurs de vapeur où les gaz de combustion passent à l'intérieur de tubes submergés dans l'eau. Cette technologie est bien adaptée à la fourniture de vapeur saturée sous faibles pressions (<15 bars).

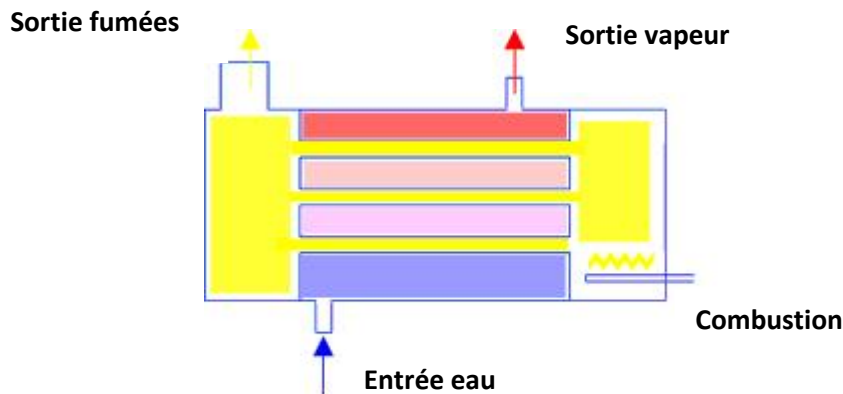


Figure II.1.1 : Principe d'un générateur de vapeur à tubes de fumée.[6]

- **Générateurs de vapeur à tubes d'eau :**

Ce sont des générateurs de vapeur dans lesquels l'eau circule dans les tubes qui sont chauffés extérieurement par les gaz de combustion. Ils représentent la grande majorité des générateurs de vapeur en service et sont bien adaptés pour générer de la vapeur surchauffée à moyenne et forte pression.

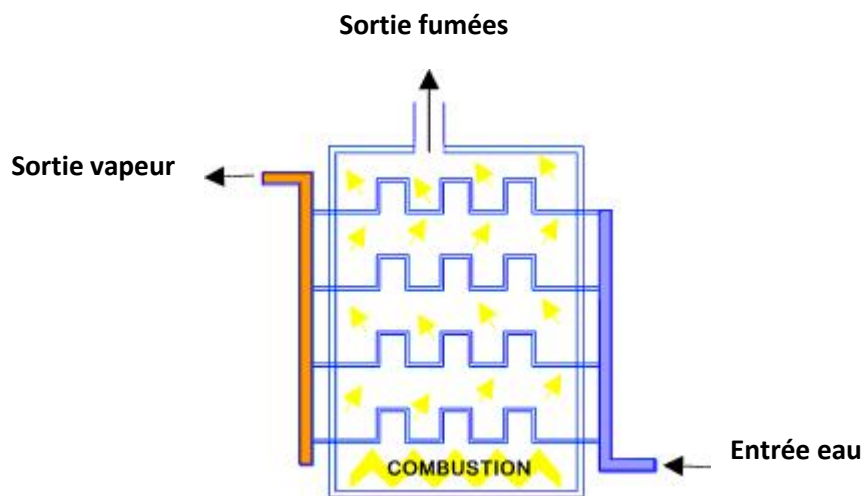


Figure II.1.2 : Principe d'un générateur de vapeur à tubes d'eau.[6]

➤ Selon les modes de circulation :

La circulation a deux objectifs principaux qui sont d'assurer le refroidissement correct des tubes situés dans les zones les plus chaudes et de générer de la vapeur saturée.

Pour cela on distingue deux types de générateurs :

- Générateurs de vapeur à circulation naturelle.
- Générateurs de vapeur à circulation forcée.

- **Générateurs de vapeur à circulation naturelle :**

La circulation de l'émulsion est dite naturelle, lorsque elle s'établit d'elle-même dans les circuits de la chaudière, et ceci est dû au fait que la masse volumique de la vapeur d'eau soit plus faible que celle de l'eau liquide.

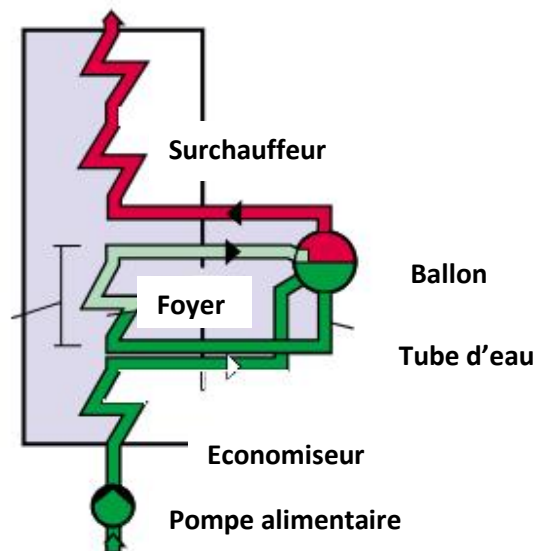


Figure II.1.3 : Principe de la circulation naturelle.[7]

- **Générateur de vapeur à circulation forcée :**

La circulation de l'eau dans ce type de chaudière est assurée par les pompes alimentaires dont la hauteur de refoulement est déterminée en tenant compte de la perte de charge totale des circuits évaporateur et surchauffeurs.

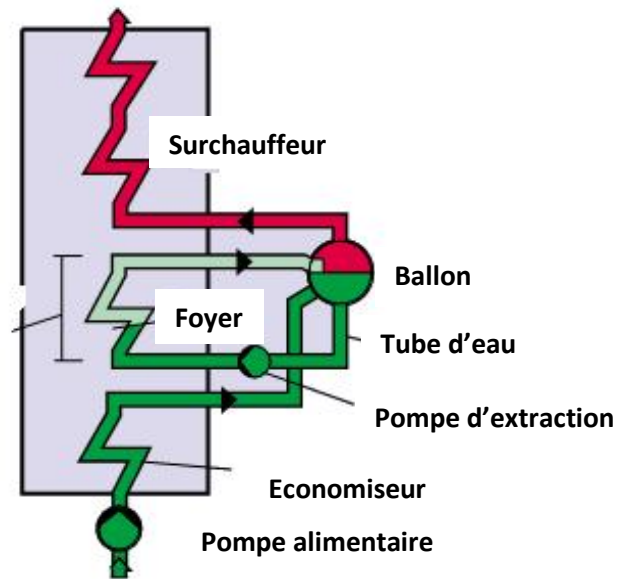


Figure II.1.4 : Principe de la circulation forcée.[7]

➤ Selon le support :

Deux catégories de générateurs sont disponibles :

- Générateurs de vapeur suspendus.
- Générateurs de vapeur posés.

➤ Selon le mode d'emploi :

On distingue deux types de générateurs :

- Générateur de vapeur fixe.
- Générateur de vapeur mobile.

II.1.5. Description du générateur de vapeur de la centrale de Cap Djinet

La chaudière de la centrale thermique de Cap Djinet est de type à circulation naturelle et ses caractéristiques sont les suivantes :

Tableau II.1.1 : Paramètres du générateur de vapeur

Paramètres thermohydrauliques	Valeurs	Unités
Capacité de vaporisation maximale	530	t/h
Pression à la sortie des surchauffeurs	154	bars
Température de la vapeur surchauffée	540	°C
Pression à la sortie du resurchauffeur	35 à 37	bars
Température de vapeur resurchauffée	540	°C
Température maximale de l'eau d'alimentation	246	°C

Elle est principalement constituée :

- De l'économiseur.
- Du ballon.
- Des colonnes de descentes.
- De la chambre de combustion formée par les tubes écrans.
- De surchauffeurs et resurchauffeurs.
- Des brûleurs.

Voici ci après un plan d'une chaudière qui représente ses différents constituants.

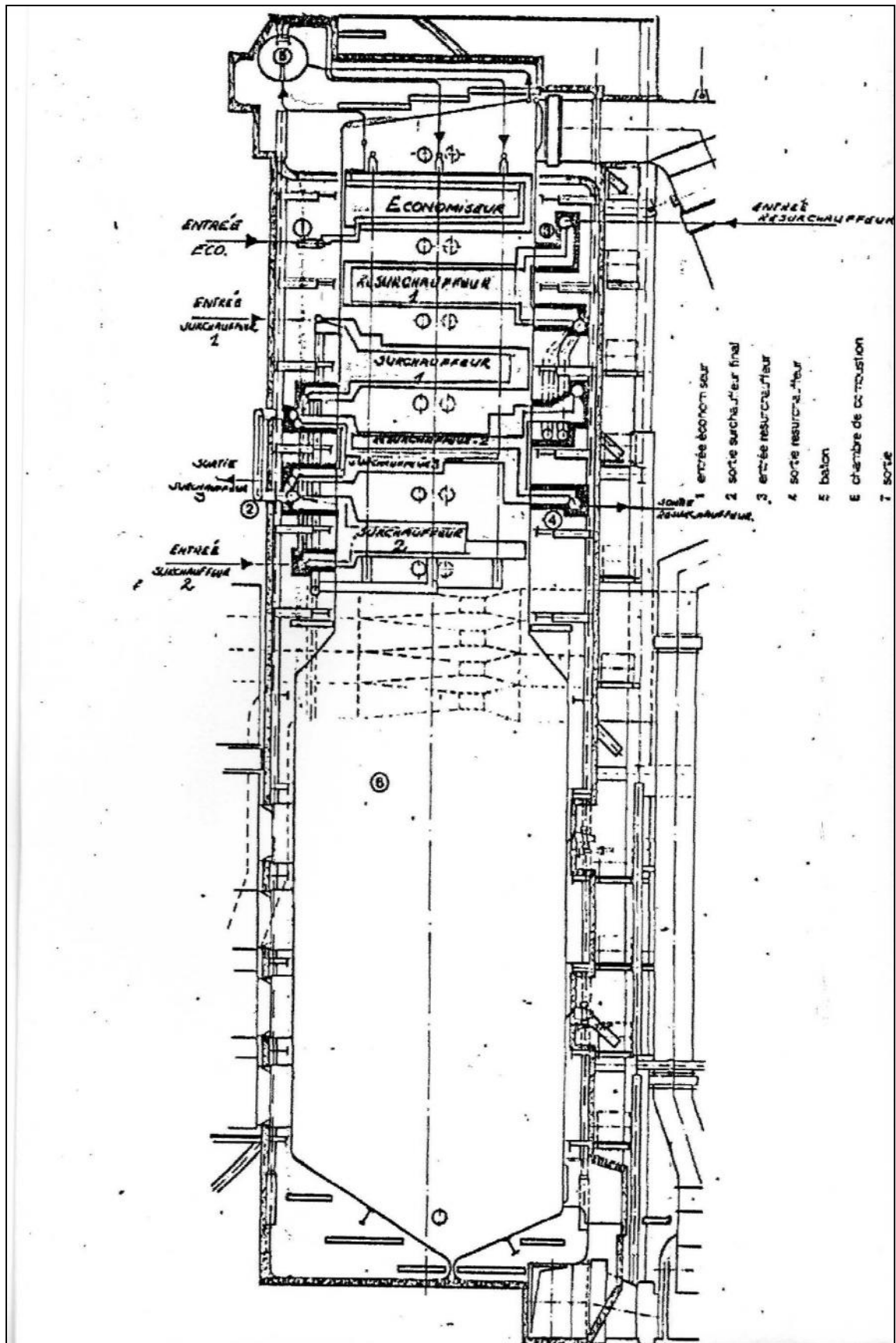


Figure II.1.5 : Plan d'ensemble du générateur de vapeur. [8]

II.1.5.1. Caractéristiques des composants de la chaudière

Pour décrire le fonctionnement de la chaudière nous allons la répartir en trois sections :

- Circuit eau-vapeur
- Système d'air et de fumées
- Combustibles et système de brûleurs

II.1.5.1.1. Circuit eau-vapeur

Avant d'être introduite dans le réservoir du générateur de vapeur, l'eau d'alimentation déjà réchauffée par le passage dans le poste de réchauffage, traverse un échangeur de chaleur situé sur le parcours des gaz de combustion appelé économiseur.

L'eau d'alimentation est pompée dans l'économiseur par les pompes d'alimentation.

A. l'économiseur

C'est un échangeur de chaleur dont le type de tuyauterie est en forme de serpent, 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 bêche alimentaire et l'écran vaporisateur froid. L'échange de chaleur au niveau de l'économiseur se fait par convection.

Tableau II.1.2 : Paramètres de l'économiseur

Paramètres	Valeurs	Unités
Timbre	172	bars
Pression de service à l'entrée	164.3	bars
Pression d'essai	258	bars
Volume d'eau	10.5	m ³
Surface de chauffe	2080	m ²

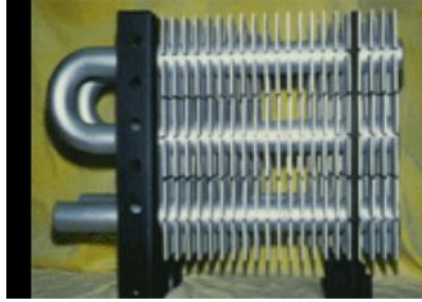


Figure II.1.6 : Economiseur

B. Ballon de chaudière

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.

Le ballon est un dispositif très important ce qui lui vaut une surveillance particulière et ce grâce à :

- Un indicateur de niveau d'eau.
La connaissance précise du niveau réel dans le ballon prend toute son importance aux valeurs minimales et maximales tolérées en fonctionnement, à savoir :
 - Niveau très bas : risque de manque d'eau dans certain tubes de la chaudière.
 - Niveau très haut : mauvais fonctionnement des séparateurs et risque d'entraînement d'eau vers les tubes surchauffeurs.
- Trois soupapes de sûreté.
- Une soupape de trop plein.
- Deux systèmes de télésurveillance.

Tableau II.1.3: Paramètres du ballon chaudière

paramètres	valeurs	unités
Timbre	172	bars
Pression de service	160	bars
Volume d'eau	26.9	m ³

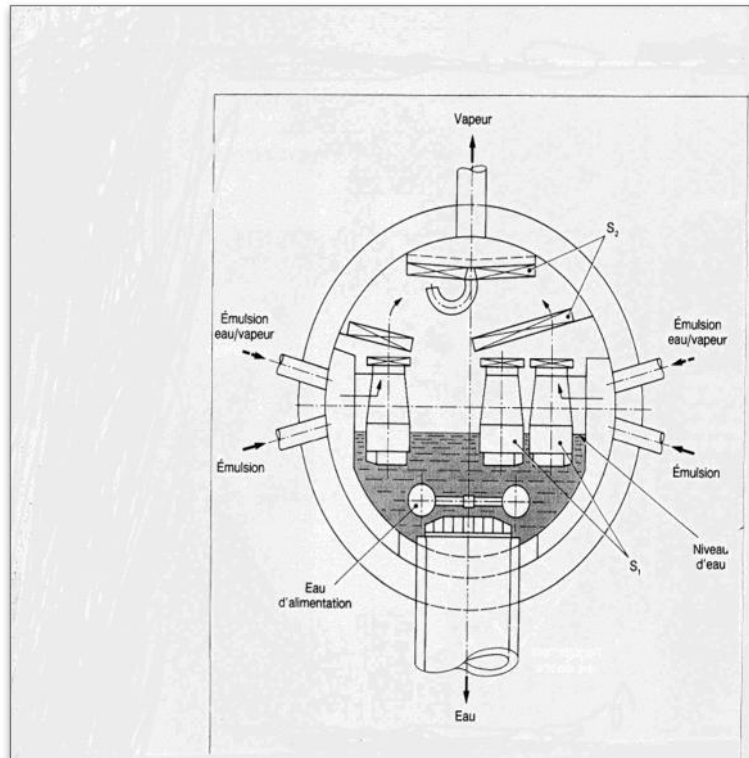


Figure II.1.7: Ballon chaudière.[9]

C. 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.

Tableau II.1.4: Paramètres des écrans vaporisateurs

Paramètres	Valeurs	Unités
Surface de chauffe	1980	m ²
Timbre	172	bars
Pression de service	160	bars
Volume d'eau	37.01	m ³

D. 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 contre courant 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.

Les deux désurchauffeurs servent à protéger les surchauffeurs contre des températures élevées, et à maintenir la température à la sortie de la chaudière. L'eau de désurchauffe est prise de la conduite d'eau d'alimentation. La sortie du dernier surchauffeur mène directement à la conduite de la vapeur vive d'où la vapeur est guidée vers la partie haute pression de la turbine.

Tableau II.1.5: Paramètres des surchauffeurs

paramètres	Surchauffeur primaire	Surchauffeur secondaire	Surchauffeur final	unités
Surface de chauffe	1565	581	538	m ²
Timbre	172	172	172	bars
Pression de service	160		145,7	bars

E. 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.

Tableau II.1.6: Paramètres des resurchauffeurs

paramètres	Resurchauffeur primaire	Resurchauffeur secondaire	unités
Surface de chauffe	1832	929	m ²
Timbre	48	48	bars
Pression de service	39	37	bars
Volume d'eau	18,96	10,11	m ³

Nous avons ci après un schéma qui illustre les différentes étapes de la transformation d'eau en vapeur.

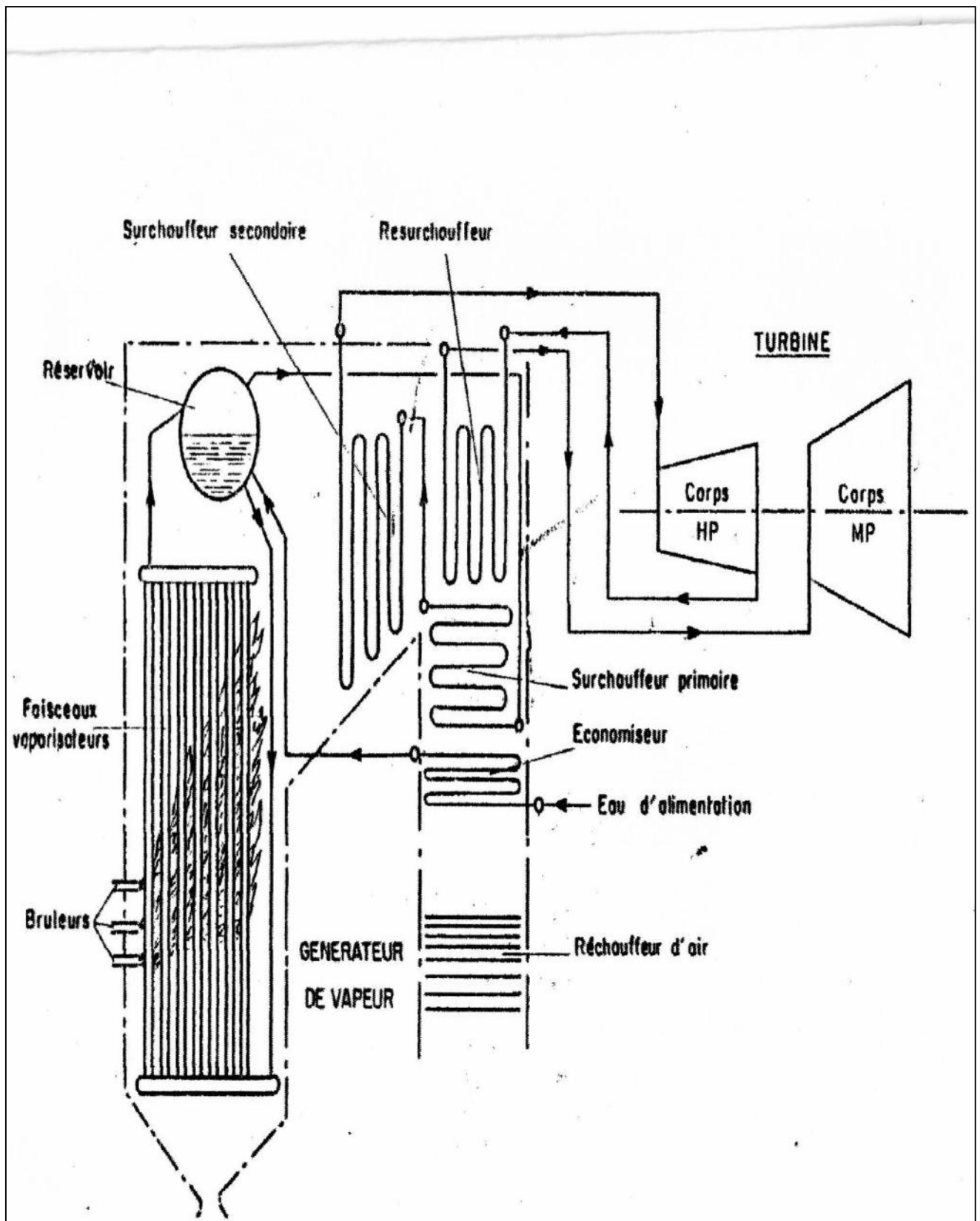


Figure II.1.8 : circuit eau-vapeur.[2]

II.1.5.1.2. Circuit d'air et de fumées

A. 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.

Chaque générateur de vapeur contient deux ventilateurs de soufflage ; ils sont prévus pour fournir le débit d'air correspondant à la charge maximale de la chaudière en plus d'une marge de sécurité.

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.

Tableau II.1.7 : Paramètres des ventilateurs de soufflage

paramètres	valeurs	unités
Débit	77,92	m ³ /sec
Température d'aspiration	30	° C
Pression statique	97,02	mbar
Pression totale	99,64	mbar
Puissance du moteur	1200	KW

B. Réchauffeur d'air rotatif

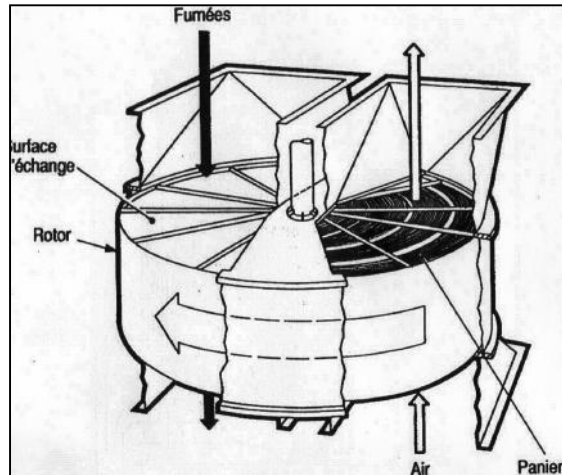
Il sert à réchauffer l'air de combustion qui arrive dans chaque brûleur en récupérant la chaleur dégagée par les fumées.

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 dégagées par les fumées et la transmettent ensuite à l'air, ce qui induit une élévation de la température d'environ 16°C.

Il est entraîné par un moteur électrique triphasé ; un moteur alimenté par un courant continu est prévu en cas de défaillance du premier et un dispositif de virage manuel est aussi prévu en cas de besoin.

Tableau II.1.8:Paramètres du réchauffeur d'air rotatif

Paramètres	Valeurs	Unités
Surface de chauffe	31690	m ²
Température maximale de préchauffage d'air	330	°C

**Figure II.1.9 :** réchauffeur d'air rotatif.[9]

C. 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 produite 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.

Tableau II.1.9 : Paramètres des ventilateurs de recyclage

Paramètre	Valeurs	Unités
Débit	57,71	m ³ /sec
Température des gaz de fumée	450	° C
Pression statique	30	mbars
Pression totale	31,37	mbars
Puissance du moteur	500	KW

D. Préchauffeurs d'air

Ils servent à augmenter la température d'air de combustion avant le réchauffeur d'air rotatif et ceci afin qu'aucune condensation ne se produise sur les tôles de chauffe du réchauffeur d'air rotatif

E. brûleurs

La chaudière est équipée de huit brûleurs répartis sur quatre étages. Ils sont prévus pour un fonctionnement mixte : gaz naturel comme combustible principal et fuel oil domestique comme combustible de secours. Un brûleur d'allumage est prévu pour l'allumage du brûleur principal.

Les brûleurs ont pour but d'engendrer et d'entretenir la combustion du combustible dont ils assurent le mélange intime et homogène avec l'air comburant.

Leur conception diffère selon le type de combustible.

Afin de mieux comprendre nous avons ci-dessous un schéma simplifié représentant les différents parcours d'air et de fumées.

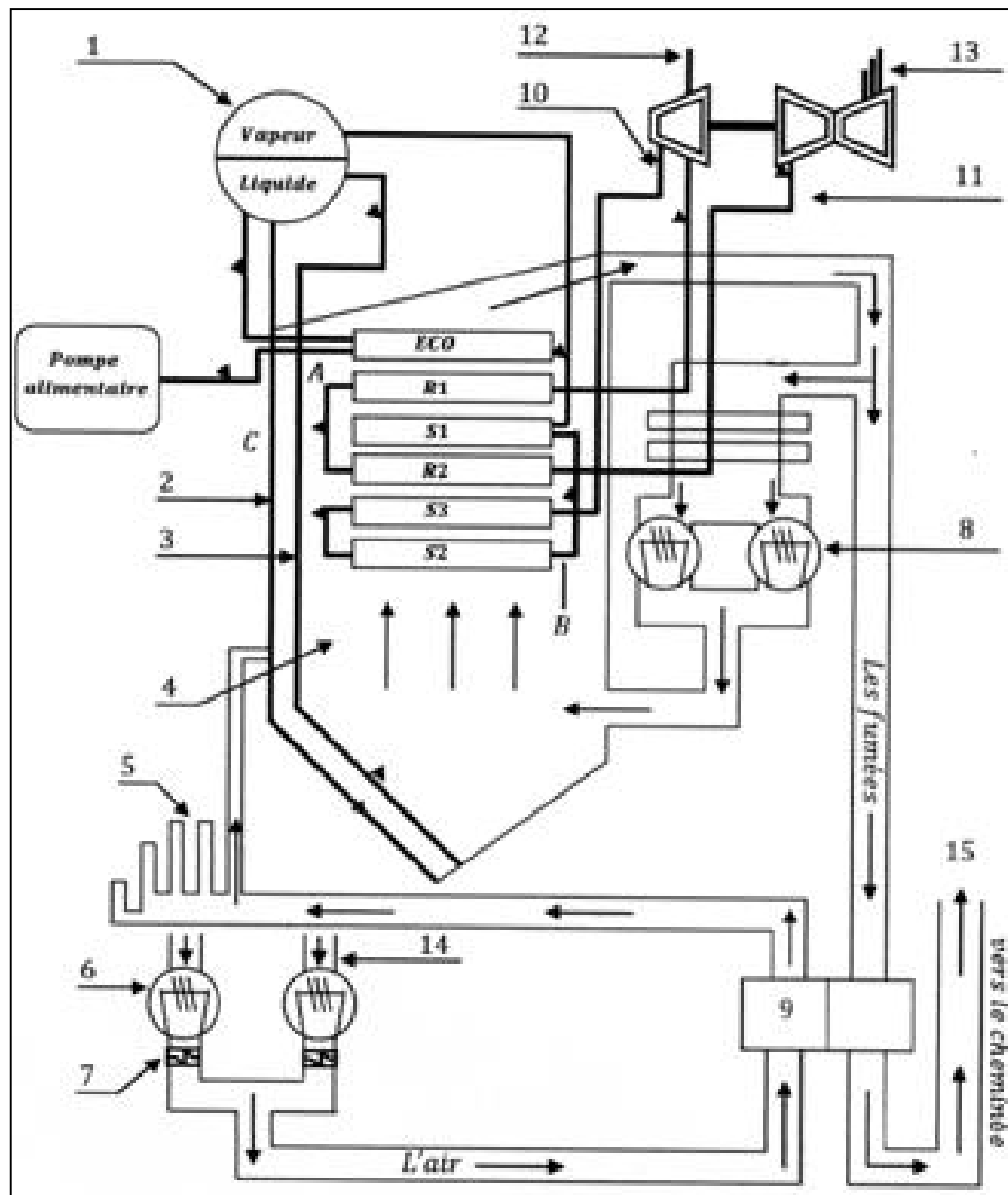


Figure II.1.10 : Schéma du circuit air-fumées de la chaudière de Cap Djinet. [10]

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 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. Tubes 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. Réchauffeur d'air rotatif. | C. Le générateur de vapeur |

➤ **Alimentation an gaz :**

Le gaz naturel arrive du poste de détente principal à une pression de 6 bars au niveau de la conduite principale, ensuite il passe dans deux autres conduites qui alimentent chacune une rampe de brûleurs.

La première conduite alimente les brûleurs 1, 2, 3 et 4 et la seconde alimente les brûleurs 5, 6, 7 et 8.

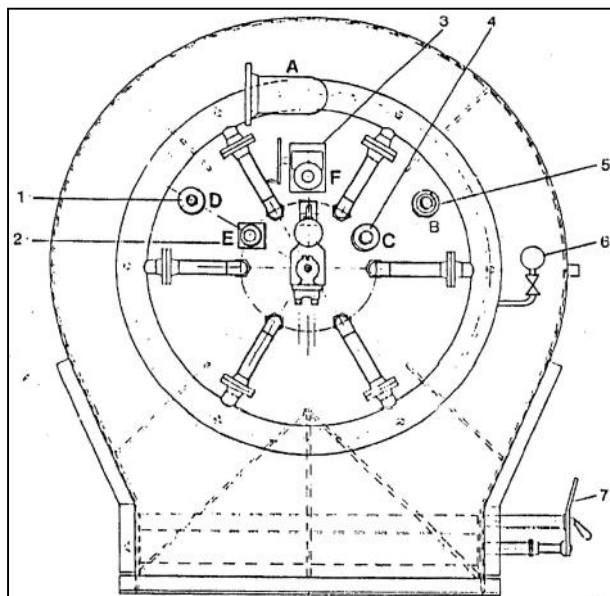
➤ **Alimentation au fuel :**

Comme les brûleurs sont conçus pour un fonctionnement mixte, la lance fuel est montée dans l'axe du brûleur.

Le fuel est conduit à la chaudière par une conduite principale, ensuite il est distribué au niveau de chaque brûleur à travers des conduites.

Tableau II.1.10 : Paramètres des brûleurs lors d'une alimentation au gaz naturel

Paramètre	Valeurs	Unités
Nombre de lance à gaz par brûleurs	6	
Débit gaz naturel	5000	Nm ³ /h
Débit gaz minimal	1200	Nm ³ /h



- 1 → détecteur de flamme (au fuel).
- 2 → brûleur d'allumage.
- 3 → élément de commande.
- 4 → tube regard.
- 5 → détecteur de flamme (au gaz).
- 6 → manomètre.
- 7 → clapet d'air primaire.

Figure II.1.11 : Brûleur.[8]

F. Air de refroidissement

Deux ventilateurs d'air de refroidissement et d'air d'allumage sont prévus afin d'alimenter :

- Les contrôleurs de flamme.
- Le brûleur d'allumage.
- La lance du brûleur au fuel.

II.1.5.1.3. Chambre de combustion

C'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 parois latérales des chambres sont presque toujours tapissées de tubes écrans, faisant partie du faisceau vaporisateur. La sortie des gaz chaud se fait souvent à travers une partie de la paroi arrière de la chambre et les tubes forment alors, un écran non jointif qui protège le surchauffeur.

La chambre de combustion un grand volume de métal de 9675 mm de longueur, de 17000 mm de hauteur, et de 9375 mm de largeur.

Elle est équipée :

- De hublots sur les parois latérales et arrières pour contrôler la combustion de tous les brûleurs et avoir une vision totale de la flamme, ils sont protégés par l'air de barrage.
- Deux caméras afin de transmettre l'image des flammes en salle de commande, elles sont refroidies par l'eau de circuit de refroidissement NORIA.

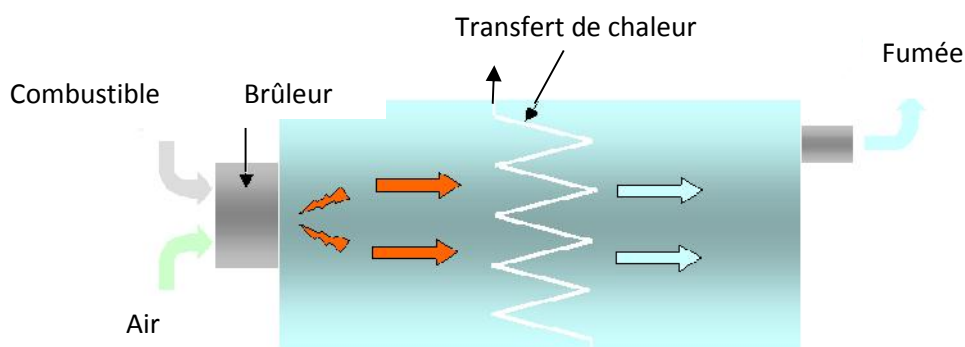


Figure II.1.12 : Bilan thermique dans la chambre de combustion.[7]

II.1.5.1.4. 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.

II.1.5.2. Mode de fonctionnement du générateur de vapeur de la centrale de Cap Djinet

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.

A 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.

A la sortie du surchauffeur final, 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. A 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.

La turbine comporte six soutirages :

-3 soutirages du corps BP qui alimentent les trois réchauffeurs BP.

-2 soutirages du corps MP qui alimentent la bêche alimentaire, le réchauffeur HP5 et le circuit de vapeur auxiliaire (RQ).

-1 soutirage du corps HP qui alimente le réchauffeur HP6.

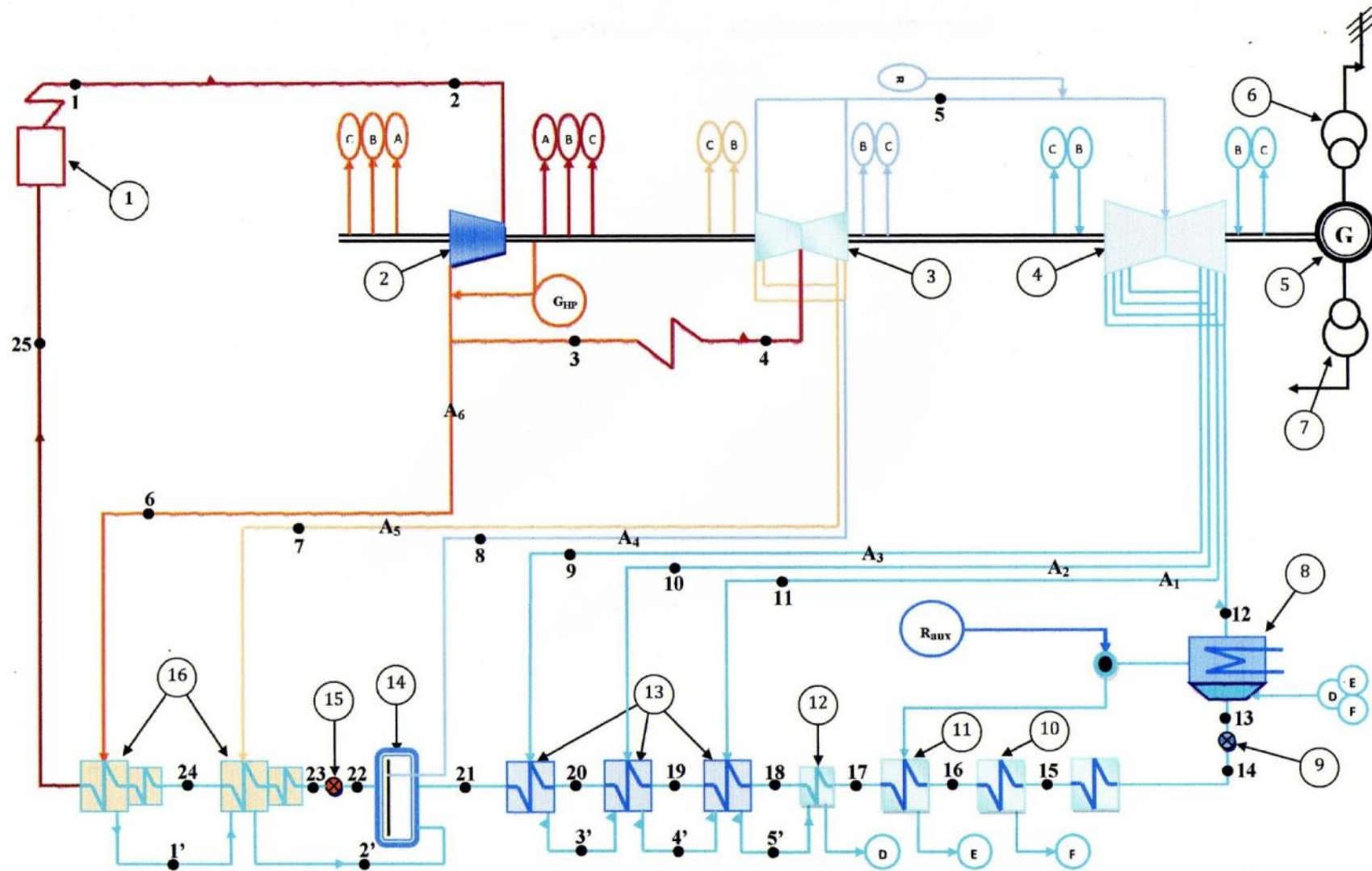


Figure II.1.13 : Schéma synoptique de la centrale de Cap Djinet.[11]

- | | |
|--------------------------------|---|
| 1. Générateur de vapeur. | 9. Pompe d'extraction. |
| 2. Turbine à haute pression. | 10. Condenseur de buées. |
| 3. Turbine à moyenne pression. | 11. Injecteur de vapeur. |
| 4. Turbine à Basse pression. | 12. Refroidisseur de purges. |
| 5. Alternateur. | 13. Réchauffeurs basse pression 1,2 et 3. |
| 6. Transformateur principal. | 14. Bâche alimentaire. |
| 7. Transformateur auxiliaire. | 15. Pompe alimentaire. |
| 8. Condenseur. | 16. Réchauffeurs haute pression 5 et 6. |

II.2. Introduction au phénomène de la combustion

II.2.1. Introduction

Le mode de production le plus couramment rencontré dans l'industrie est la combustion.

La combustion est la source de l'énergie calorifique nécessaire à la vaporisation de l'eau dans la chaudière, et vu sa grande importance et son influence sur le rendement, il est impératif de lui consacrer une étude.

II.2.2. Définitions

II.2.2.1. La combustion

La combustion est une réaction chimique d'oxydation. Elle ne peut se produire que si l'on réunit trois éléments essentiels qui sont :

- Un combustible.
- Un comburant.
- Une énergie d'activation en quantité suffisante.

La combustion se matérialise par une flamme, fort dégagement de chaleur et une réaction exothermique. Une condition importante à cette réaction, l'homogénéité du mélange du combustible et du comburant, ceci étant le rôle du brûleur qui dose le mélange (air/gaz par exemple) et stabilise la réaction.

La combustion est dite « lente » s'il y'a dégagement de chaleur sans flamme, ni incandescence et sera « vive » s'il y'a dégagement de chaleur avec inflammation.

II.2.2.2. Le facteur d'air λ

C'est le rapport entre le volume d'air réellement fourni à la combustion et le volume d'air nécessaire à la combustion complète neutre, dans les conditions normales de pression et de température (0°C et 1 atm)

$\lambda < 1 \rightarrow$ combustion réductrice.

$\lambda = 1 \rightarrow$ combustion stoechiométrique.

$\lambda > 1 \rightarrow$ combustion oxydante.

II.2.2.3. La richesse d'un mélange R

La richesse est l'inverse du facteur d'air.

$$R = \frac{1}{\lambda}$$

$R < 1 \rightarrow$ mélange pauvre.

$R < 1 \rightarrow$ mélange stoechiométrique.

$R < 1 \rightarrow$ mélange riche.

II.2.3. Les différents types de combustion**II.2.3.1. La combustion théorique ou stœchiométrique**

C'est une combustion neutre, elle est réalisée en présence d'un volume d'air apportant exactement le volume d'oxygène nécessaire pour l'ensemble des réactions qui se produisent.

Ce type de réaction donne naissance à des fumées de CO_2 , H_2O et N_2 .

Elle représente un cas idéal impossible à réaliser dans la pratique.

II.2.3.2. La combustion réelle**1. La combustion oxydante (en excès d'air)**

C'est une combustion complète en présence d'un volume d'air supérieur à celui de la combustion neutre (réelle).

Dans la majorité des applications industrielles l'excès d'air est réalisé dans le but de s'assurer que tous les éléments combustibles rencontrent de l'oxygène avant d'être évacués du foyer de combustion. Donc s'assurer de l'oxydation du monoxyde de carbone CO .

2. La combustion réductrice (en défaut d'air)

C'est une combustion incomplète, car on ne dispose pas d'une quantité d'air suffisante pour brûler la totalité des constituants du combustible. Une partie de ces constituants se trouve donc sous forme d'imbrûlés, et ceci soit dans le combustible lui-même (combustibles solides), soit sous forme de suie ou de gaz.

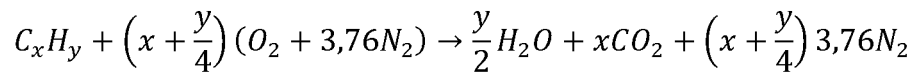
La fraction du combustible qui n'a pas été brûlée entièrement n'engendre pas de CO_2 et donc les fumées dégagées contiennent une quantité de CO_2 moindre par rapport à la combustion théorique.

Le fait que la combustion s'effectue en défaut d'air n'exclut pas la présence d'oxygène dans les fumées, et cela est dû à l'absence d'une ou plusieurs conditions pour une bonne combustion, d'où l'importance d'effectuer l'analyse des fumées qui consiste à déterminer les teneurs en CO_2 , SO_2 , O_2 et CO pour le contrôle de la combustion.

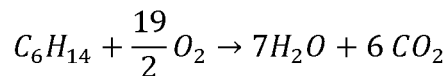
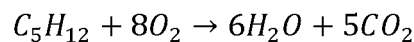
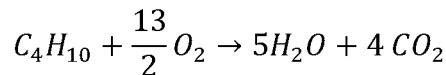
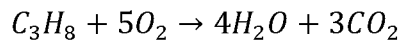
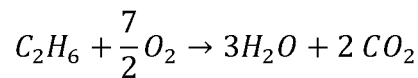
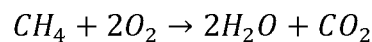
II.2.4. Les formules chimiques de la combustion

II.2.4.1. La réaction générale de la combustion

La réaction générale de la combustion des différents constituants du gaz naturel dans l'air atmosphérique est la suivante :



II.2.4.2. Les réactions d'oxydation qui régissent la combustion du gaz naturel



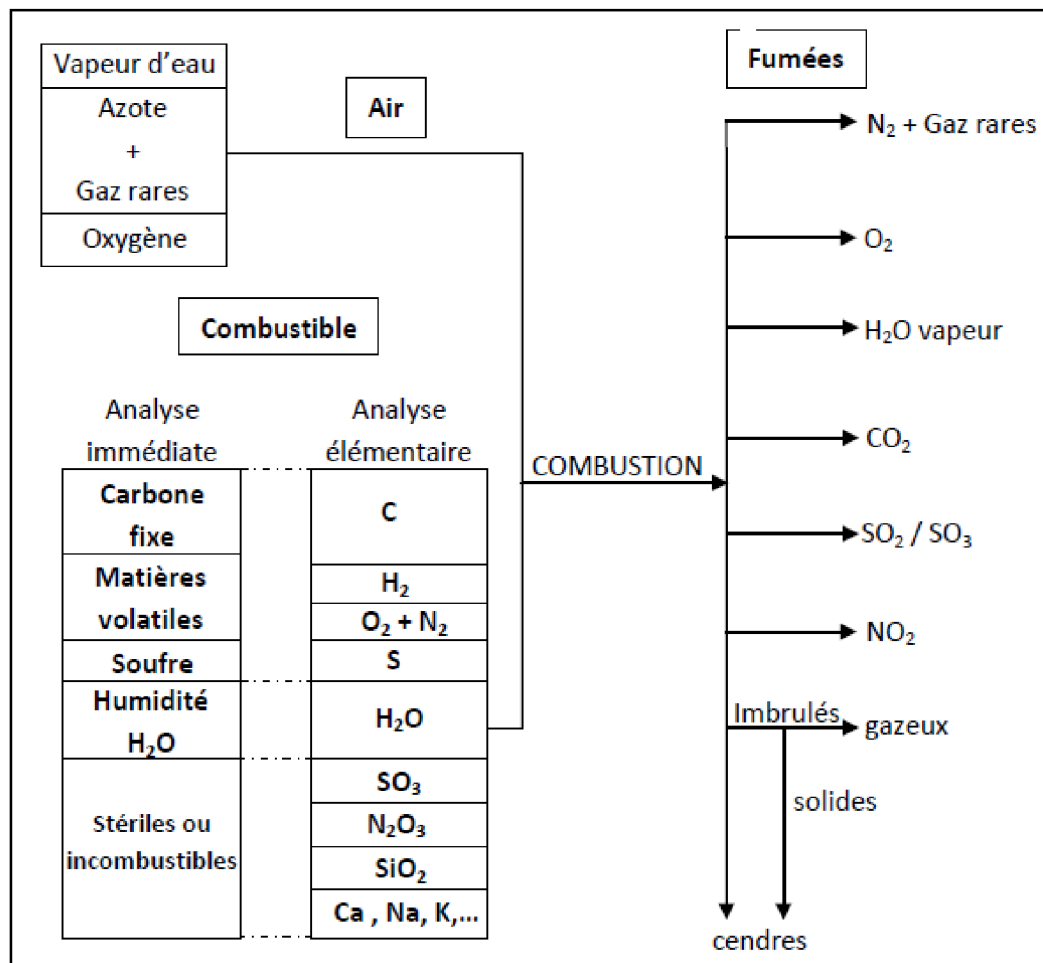


Figure II.2.1 : schéma de la combustion.[9]

II.2.5. Définition d'un combustible

Un combustible est un mélange complexe composé d'éléments chimiques.

On peut classer les combustibles en trois catégories :

- Les combustibles liquides.
- Les combustibles solides.
- Les combustibles gazeux.

Tableau II.2.1 : Classification des combustibles[12]

groupes	Classes	sous-classes	familles
Combustibles solides	Combustibles Naturels	charbon	
		tourbes	
		végétaux	Bois, déchets de bois, écorces, végétaux secs
	Combustibles Artificiels	agglomérés	
		Charbon de bois	
		Sous-produits	
Combustibles liquides	Combustibles Artificiels	Huiles minérales	
		Goudrons de houille	
		Sous-produits	Liqueurs noires concentrées
Combustibles gazeux	Combustibles Naturels	Gaz naturel	
	Combustibles Artificiels	Gaz de gazogène	Gaz à l'air, gaz à l'eau
		Gaz de distillation sèche	Gaz de coke

Les combustibles sont multiples (gaz, pétrole, bois, charbon...) mais ils ont un point commun, celui de contenir des combinaisons multiples de carbone et d'hydrogène représentées par la formule générale C_xH_y .

Tous les combustibles naturels contiennent aussi du soufre.

Dans notre cas le combustible utilisé est le gaz naturel.

II.2.6. Caractéristiques physico-chimiques des combustibles

Ces caractéristiques sont nécessaires pour résoudre les quatre questions liées à la combustion, à savoir :

- Première question : quelle quantité d'air doit-on fournir et quelle est la quantité de fumées produites ainsi que leur composition ?

Afin d'y répondre on doit connaître deux caractéristiques qui sont le pouvoir combivore et le pouvoir fumigène.

a. Le pouvoir combivore

C'est la quantité d'air juste suffisante pour brûler 1kg de combustible solide ou liquide ou bien 1m³ de combustible gazeux.

b. Le pouvoir fumigène

C'est la quantité de fumées produites par la combustion de 1kg de combustible solide ou liquide ou bien 1m³ de combustible gazeux.

- Deuxième question : quelle est la quantité de chaleur produite lors de la combustion ?
Pour répondre à cette question on doit connaître le pouvoir calorifique.

c. Le pouvoir calorifique

C'est la quantité de chaleur exprimée en kilocalories dégagée par la combustion complète de 1kg de combustible solide ou liquide ou bien de 1m³ de combustible gazeux dans les conditions normales de pression et de température (1atm et 0°C).

On distingue le pouvoir calorifique supérieur et le pouvoir calorifique inférieur.

1. Le pouvoir calorifique supérieur (PCS)

C'est la quantité de chaleur exprimée en kilocalories dégagée par la combustion complète de 1kg de combustible solide ou liquide ou bien de 1m³ de combustible gazeux dans les conditions normales de pression et de température (1atm et 0°C).

L'eau qui s'est formée lors de la combustion est ramenée à l'état liquide, sa chaleur latente est récupérée car elle apporte des calories supplémentaires.

2. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI)

C'est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible.

L'eau cette fois est à l'état vapeur, sa chaleur latente de vaporisation ne peut pas être utilisée.

❖ **Relation entre le PCS et le PCI**

Le pouvoir calorifique supérieur est toujours supérieur au pouvoir calorifique inférieur.

$$PCS = PCI + m_{H_2O} * L_V$$

Où :

m_{H_2O} : Masse d'eau condensée

L_V : Chaleur latente de vaporisation

- Troisième question : quelle est la température atteinte lors de la combustion ?
Pour répondre à cela il faut connaître la température de combustion.

d. La température de combustion

Cette température pratique peut être contrôlée par la mesure et l'on trouve pour une chaudière à vapeur, une température de l'ordre de $1500^{\circ}C$.

On peut aussi la calculer par la formule suivante :

$$\begin{aligned} & \text{chaleur produite par la combustion} \\ & = \\ & \text{échauffement de produits de combustion} \\ & + \\ & \text{compensation des pertes par rayonnement} \\ & + \\ & \text{chaleur absorbée par la dissociation} \end{aligned}$$

Quatrième question : comment le combustible s'enflamme t-il et sa combustion est elle stable ?

On doit prendre connaissance de l'inflammabilité.

e. L'inflammabilité

Elle caractérise l'aptitude du combustible à s'enflammer spontanément ou en présence d'un point incandescent.

II.2.7. Le comburant

La plupart du temps il s'agit de l'air ambiant et plus particulièrement de l'un de ses composants principaux : le dioxygène.

II.2.8. L'énergie d'activation

C'est la quantité de chaleur nécessaire pour amorcer la réaction, pour lui permettre d'atteindre la température d'auto-inflammation.

II.2.9. Les paramètres les plus contrôlés dans l'analyse des gaz de combustion[13]**II.2.9.1. La température des fumées**

Ce paramètre dépend de la géométrie de la chaudière, des allures de la combustion et de la charge.

II.2.9.2. L'excès d'air

L'excès d'air est nécessaire pour obtenir une réaction de combustion complète du carburant.

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

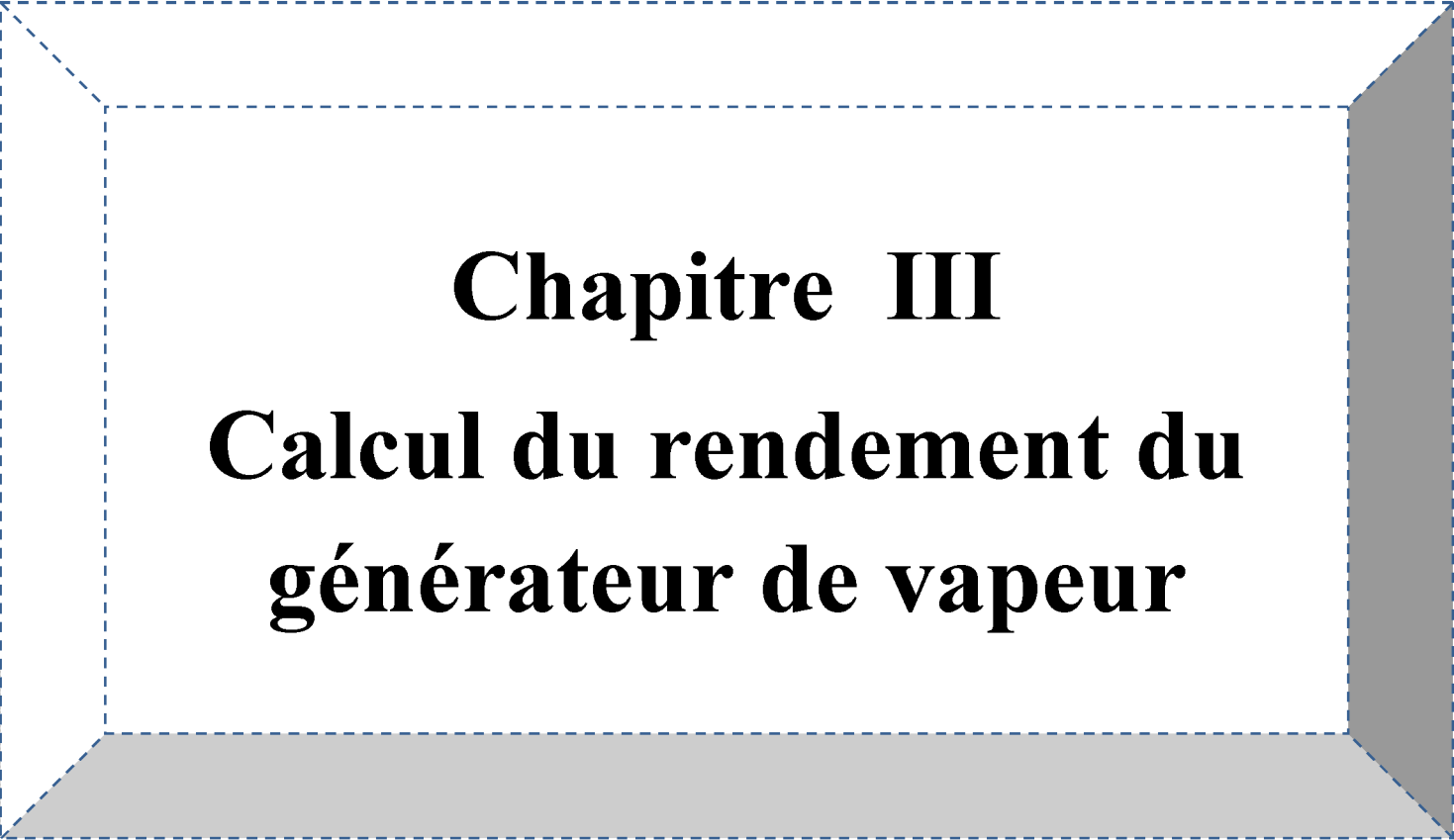
Pour augmenter ou réduire l'excès d'air dans une chaudière, on agit sur les volets d'air au niveau des brûleurs ou sur le débit du carburant.

II.2.9.3. La concentration en monoxyde de carbone CO

Le monoxyde de carbone se produit surtout lorsqu'il n'y a pas suffisamment d'air.

Dans le cas où on a en même temps un excès d'air et une forte concentration en CO, il faudrait revoir la pulvérisation du carburant et le mécanisme de mélange air-carburant au niveau du brûleur.

Le monoxyde de carbone présente une forme de carburant imbrûlée et peut exploser à certaines concentrations.



Chapitre III

Calcul du rendement du générateur de vapeur

III. Introduction

Généralement la chaleur produite par combustion n'est jamais totalement transférée ou récupérée par le fluide qu'on désire chauffer, car il existe toujours des pertes dues aux différents facteurs. Plusieurs paramètres influencent la valeur de ce rendement, dont la température et la pression d'entrée de l'eau, du comburant et du fuel, la nature de l'eau entrante, le niveau de l'eau dans la chaudière, voir même la variation de la demande en consommation de la vapeur.

Le calcul du rendement de la chaudière peut se faire par deux méthodes : La méthode directe et la méthode indirecte.

Le calcul du rendement des chaudières par la méthode indirecte est fondé sur le code d'essai de puissance de l'American Society of Mechanical Engineers (ASME) pour les générateurs de vapeur (PTC 4.1 – 1964 réaffirmé en 1973, aussi désigné par l'appellation ANSI 1998) qui porte sur une grande variété de configurations d'équipements et qui tient compte de plusieurs sources de perte et gain d'énergie.

Tandis que la méthode directe se base sur le bilan thermique au niveau de la chaudière.

Cette méthode exige la mesure précise de la quantité et du pouvoir calorifique du combustible, ainsi que la chaleur produite par la chaudière sous forme de vapeur.

L'expression donnant le rendement de la chaudière par la méthode indirecte est :

$$\eta_G = 100 - \frac{L_T * 100}{B_{TOT}}$$

Où :

L_T : Quantité de chaleur perdue par la chaudière

B_{TOT} : Quantité de chaleur introduite dans la chaudière

Et l'expression donnant le rendement de la chaudière par la méthode directe est :

$$\eta = \frac{\sum Q_i * H_i}{Q_{gaz} * B_{TOT}}$$

Où :

$\sum Q_i * H_i$: Puissance utile à la chaudière

$Q_{gaz} * B_{TOT}$: Puissance fournie par la chaudière

III.1. calcul du rendement de la chaudière de la centrale de Cap Djinet par la méthode indirecte

III.1.1. Les différentes pertes dans la chaudière

Au niveau de la chaudière on retrouve les pertes par :

- Chaleur sensible des gaz secs
- Chaleur latente des gaz
- Échauffement et vaporisation de l'eau

III.1.1.1. Pertes par chaleur sensible des gaz secs

Les gaz sortent de la chaudière à une certaine température et compte tenu de leur composition et de la chaleur d'échauffement de chacun des composants, il se trouve qu'une quantité de chaleur correspondante est entraînée dans l'atmosphère, donc perdue.

III.1.1.2. Pertes par chaleur latente des gaz

Cette perte correspond à la chaleur non dégagée par les imbrûlés gazeux (CO , H_2 , CH_4) seul l'exploitant peut agir sur cette perte qui ne doit pas exister dans les chaudières bien conduites.

III.1.1.3. Pertes par échauffement et vaporisation de l'eau

Cette eau provient :

- De l'humidité du combustible
- De la combustion de l'hydrogène
- De l'humidité de l'air de combustion

C'est une perte qui ne peut être combattue, elle dépend essentiellement du combustible.

III.1.1.4. Pertes par rayonnement

Elles sont dues à l'échauffement des parois du générateur de vapeur. Une quantité de chaleur est ainsi cédée à l'air ambiant

III.1.2. Bilan énergétique de la chaudière

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

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

La figure ci après représente les différentes puissances pour effectuer un bilan énergétique d'une chaudière.

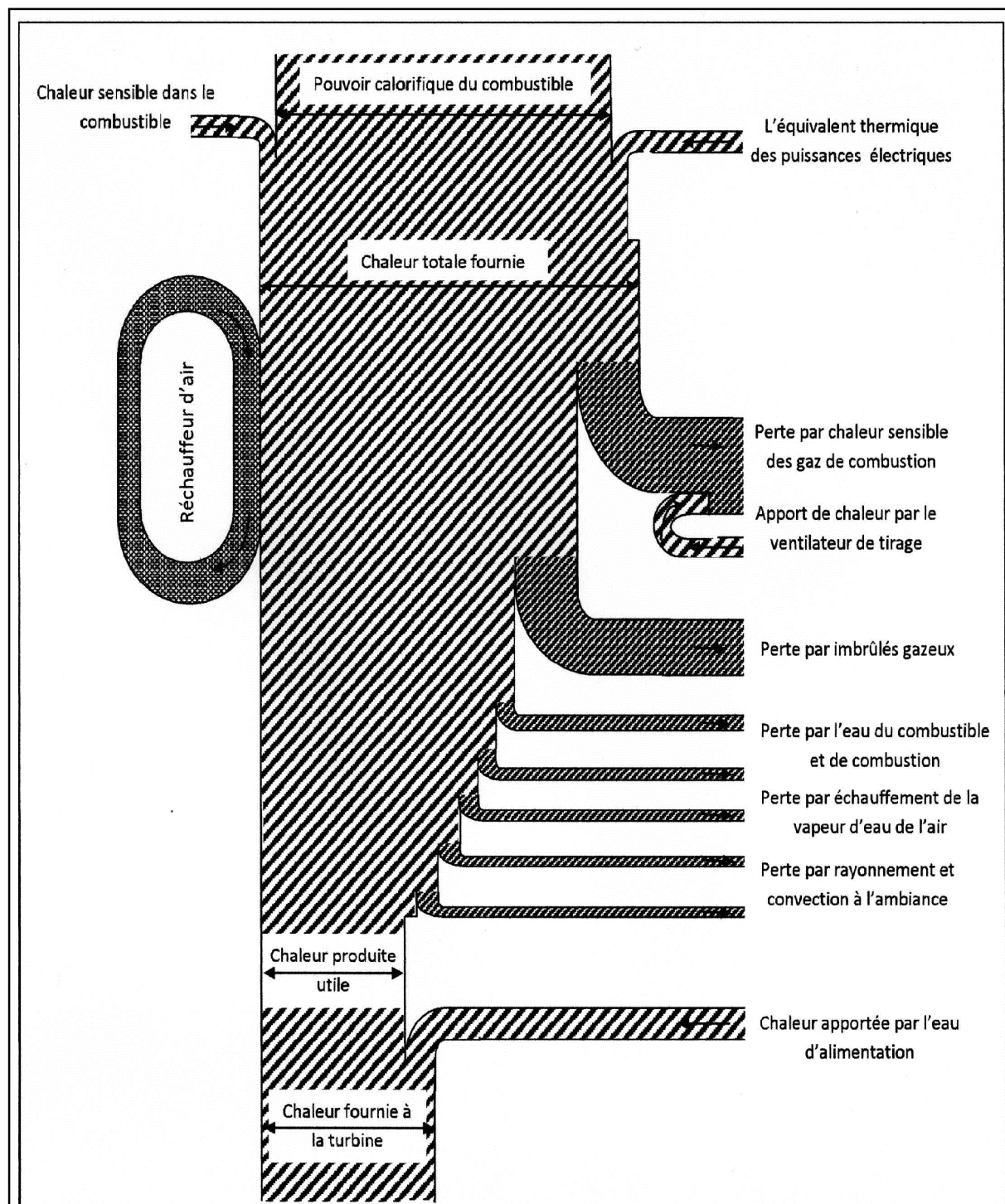


Figure III.1.1 : Représentation schématique du bilan thermique du générateur de vapeur.

III.1.3. Application de la méthode indirecte pour le calcul du rendement au générateur de vapeur de la centrale de CapDjinet[14]

La méthode indirecte sera appliquée sur le groupe N°01 pour l'année 2016 et le calcul sera fait pour une charge de 100%.

III.1.3.1. Calcul des températures

1. Température de référence T_{ref}

$$T_{ref} = T_{des} + T_{A1} - T_{amb} \quad (1)$$

Où :

T_{des} : Température ambiante de projet.

T_{A1} : Température d'essai de l'air à la sortie du ventilateur de soufflage. (C'est la moyenne des températures d'essai des deux ventilateurs de soufflage)

T_{amb} : Température ambiante d'essai de l'air.

Application numérique :

- $T_{des} = 19^{\circ}\text{C} = \text{constante}$
- $T_{amb} = 16^{\circ}\text{C}$
- $T_{A1} = 26^{\circ}\text{C}$

$$T_{ref} = 19 + 26 - 16$$

$$T_{ref} = 29^{\circ}\text{C}$$

2. Température corrigé à la sortie des fumées du réchauffeur d'air rotatif T_{f2}

$$T_{f2} = \frac{T_{ref}(T_{f1} - T_{f2}) + T_{f1}(T_{f2} - T_{A1})}{T_{f1} - T_{A1}} \quad (2)$$

Où :

T_{ref} : Température de référence de l'air à l'entrée du réchauffeur d'air.

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

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

T_{A1} : Température d'essai à la sortie du ventilateur de soufflage.

Application numérique :

- $T_{ref} = 29^{\circ}C$
- $T_{f1} = 310^{\circ}C$
- $T_{f2} = 105^{\circ}C$
- $T_{A1} = 26^{\circ}C$

$$T_{f2} = \frac{29(310 - 105) + 310(105 - 26)}{310 - 26}$$

$$T_{f2} = 107,165^{\circ}C$$

III.1.3.2. Calcul des différentes pertes de chaleur

1. Pertes de chaleur dues aux gaz de combustion $\dot{L}_g$

$$\dot{L}_g = W_g * C_p (T_{f2} - T_{ref}) \quad (3)$$

Où :

C_p : Chaleur spécifique des fumées.

W_g : Poids des fumées sèches/poids du combustible alimenté.

T_{f2} : Température corrigée à la sortie des fumées du réchauffeur d'air rotatif.

T_{ref} : Température de référence de l'air à l'entrée du réchauffeur d'air.

➤ Calcul de W_g :

Avec :

$$W_g = \frac{11 * CO_2 + 8 * O_2 + 7 * (N_2 + CO)}{3(CO_2 + CO)} * \left(C_b + \frac{3}{8} S \right) \quad (4)$$

Où :

CO_2, O_2, CO : Analyse des fumées (pourcentage en volume).

C_b, S : Teneur en carbone et en soufre.

Pour le calcul de la teneur en azote nous utiliserons la formule suivante :

$$N_2 = 100 - (CO_2 + CO + O_2) \quad (5)$$

Et pour le calcul du pourcentage en masse du carbone C_b :

$$C_b = \frac{\text{masse molaire du carbone} * 100}{\text{masse molaire du gaz}} \quad (6)$$

Application numérique :

D'après l'analyse des fumées on obtient :

- $CO_2 = 8,64\%$
- $O_2 = 5,76\%$
- $CO = 0\%$
- $S = 0\%$
- $N_2 = 100 - (8,64 + 0 + 5,76) = 85,6\%$
- $C_b = \frac{1312,5726 * 100}{1881,71} = 69,75\%$

Donc :

$$W_g = \frac{11 * 8,64 + 8 * 5,76 + 7 * (85,6 + 0)}{3(8,64 + 0)} * \left(\frac{69,75}{100} + \frac{3}{8} * 0 \right)$$

$$W_g = 19,92 \text{ kg de fumées / kg de combustible}$$

➤ Calcul de la chaleur spécifique des fumées C_p :

En utilisant un logiciel de calcul nommé REFPROP on obtient :

- $C_{p1} = 0,2439 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$ à $T_{f2} = 105^\circ\text{C}$
- $C_{p2} = 0,2411 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$ à $T_{ref} = 29^\circ\text{C}$

D'où :

$$C_m = \frac{C_{p1} + C_{p2}}{2}$$

Application numérique :

$$C_m = \frac{0,2439 + 0,2411}{2}$$

$$C_m = 0,2425 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$$

Donc les pertes de chaleur dues aux gaz de combustion seront calculées comme suit :

$$\dot{L}_g = 19,92 * 0,2425 (105 - 29)$$

$$\dot{L}_g = 367,1256 \text{ kcal/kg}$$

2. Pertes de chaleur dues à l'humidité dérivant de la combustion de l'hydrogène L_H

$$L_H = 8,936 \frac{(H)_f}{100} (h_2 - h_L) \quad (7)$$

Où :

$(H)_f$: Teneur en hydrogène dans le combustible (pourcentage en poids).

h_2 : Enthalpie de vapeur à la pression partielle de l'humidité P_{mg} et à la température T_{f2} .

h_L : Enthalpie du liquide saturé à T_{ref} .

➤ Calcul de la pression partielle de l'humidité P_{mg} :

$$P_{mg} = P_{partielle} = \frac{P_{atm}}{1 + \frac{100 * 1,5 * C_b}{mg * (CO_2 + CO)}} \quad (8)$$

Où :

P_{atm} : Pression atmosphérique.

CO_2 : Pourcentage en volume depuis l'analyse du gaz de combustion.

CO : Pourcentage en volume depuis l'analyse du gaz de combustion.

C_b : Poids du carbone/Poids du combustible brûlé.

mg : Poids de l'humidité dans les fumées / poids du combustible.

Avec :

$$mg = 8,936 * H + W_{ma} * W_a + M_f + W_z + mp \quad (9)$$

Où :

H : Teneur en hydrogène dans le combustible.

W_{ma} : Humidité absolue dans l'air.

M_f : Poids de l'humidité dans le combustible / Poids du combustible.

W_z : Poids de la vapeur d'atomisation / Poids du combustible.

mp : Poids d'humidité évaporée dans les cendres fondues / Poids du combustible.

W_a : Poids de l'air sec à l'entrée / Poids du combustible.

Avec :

$$W_a = \frac{1}{0,7685} \left[\frac{28,02 * N_2 * \left(C_b + S * \frac{12,01}{32,07} \right)}{12,01(CO_2 + CO)} - N \right] \quad (10)$$

Application numérique :

$$W_a = \frac{1}{0,7685} \left[\frac{28,02 * 85,6 * \left(0,6975 + 0 * \frac{12,01}{32,07} \right)}{12,01(8,64 + 0)} - 0,0808 \right]$$

On obtient :

$$W_a = 20,87 \text{ kg d'airsec/kg du combustible}$$

➤ Calcul de mg :

- $H = 21,77\%$
- $W_{ma} = 0,017$
- $M_f = 0$
- $W_z = 0$
- $mp = 0$

En remplaçant l'équation (10) dans l'équation (9), on obtient :

$$mg = 8,936 * 0,2177 + 0,017 * 20,87$$

$$mg = 2,3 \text{ kg d'humidité dans les fumées/kg du combustible}$$

On remplace la valeur de mg dans l'équation (8), on obtient :

$$P_{mg} = P_{partielle} = \frac{1,02}{1 + \frac{100 * 1,5 * 0,6975}{2,3 * (8,73 + 0)}}$$

$$P_{mg} = 0,1642 \text{ bar}$$

➤ Calcul de L_H :

En utilisant le même logiciel de calcul que précédemment on trouve :

- $h_L = 29,052 \text{ Kcal/kg}$ à T_{ref}
- $h_2 = 645,41 \text{ Kcal/kg}$ à la pression P_{mg} et à la température T_{f2}

Application numérique :

$$L_H = 8,936 \frac{21,77}{100} (645,41 - 29,052)$$

$$L_H = 1199,04 \text{ kcal/kg}$$

3. Pertes de chaleur dues à l'humidité dans le combustible L_{mf}

$$L_{mf} = \frac{\text{moist}}{100} (h_2 - h_v) \quad (11)$$

Où :

moist : Humidité dans le combustible alimenté.

h_2 : Enthalpie de vapeur à la pression partielle **P_{mg}** et à la température **T_{f2}** .

h_v : Enthalpie de vapeur saturée à **T_{ref}** .

Application numérique :

- **$h_2 = 645,41 \text{ kcal/kg}$**
- **$h_v = 610,36 \text{ kcal/kg}$**
- **moist = 0** d'après l'analyse des fumées

Donc :

$$L_{mf} = 0 \text{ kcal/kg}$$

4. Pertes de chaleur dues à l'humidité dans l'air **L_{ma}**

$$L_{ma} = W_{ma} * W_a * (h_2 - h_v) \quad (12)$$

Où :

W_{ma} : Humidité absolue dans l'air.

W_a : Poids d'air sec à l'entrée / Poids du combustible.

h_2 : Enthalpie de vapeur à la pression partielle **P_{mg}** et à la température **T_{f2}** .

h_v : Enthalpie de vapeur saturée à **T_{ref}** .

Application numérique :

- $h_2 = 645,41 \text{ kcal/kg}$
- $h_v = 610,36 \text{ kcal/kg}$
- $W_{ma} = 0,017$
- $W_a = 20,87 \text{ kg d'airsec/kg du combustible}$

$$L_{ma} = 0,017 * 20,87 * (645,41 - 610,36)$$

$$L_{ma} = 12,43 \text{ kcal/kg}$$

5. Pertes de chaleur dues à la formation d'oxyde de carbone L_{CO}

$$L_{CO} = \frac{CO}{CO_2 + CO} * 5644 * C_b \quad (13)$$

Où :

CO_2, CO : Pourcentages en volume à la sortie du réchauffeur d'air.

C_b : Poids de carbone brûlé / poids du combustible.

On a d'après l'analyse des fumées : $CO = 0$.

Donc :

$$L_{CO} = 0 \text{ kcal/kg}$$

6. Pertes de chaleur dues au rayonnement L_B

$$L_B = \frac{L_b}{Q_{gaz}} \quad (14)$$

Où :

L_b : Puissance perdue par rayonnement

Q_{gaz} : Débit massique du gaz

Application numérique :

- $L_b = 928627,2 \text{ kcal/h}$
- $Q_{gaz} = 36901,7 \text{ kg/h}$

D'où :

$$L_B = \frac{928627,2}{36901,7}$$

$$L_B = 25,16 \text{ kcal/kg}$$

❖ Pertes totales L_T

$$L_T = \dot{L}_g + L_H + L_{ma} + L_B \quad (15)$$

Application numérique :

$$L_T = 367,1256 + 1199,04 + 12,43 + 25,16$$

$$L_T = 1603,75 \text{ kcal/kg}$$

III.1.3.3. Calcul des crédits

1. Pouvoir calorifique supérieur PCS

Il est donné par la composition du gaz aux conditions $T = 15^\circ\text{C}$ et $P = 1\text{atm}$.

$$PCS = 11920,154 \text{ kcal/kg}$$

2. Chaleur sensible fournie par le combustible B_{fe}

$$B_{fe} = C_{pf} * (T_{fe} - T_{ref}) \quad (16)$$

Où :

C_{pf} : Chaleur spécifique moyenne du combustible.

T_{fe} : Température du combustible aux brûleurs.

T_{ref} : Température de référence.

Application numérique :

- $C_{pf} = 0,477 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$
- $T_{fe} = 9,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$B_{fe} = 0,477 * (9,5 - 29)$$

$$B_{fe} = -9,3 \text{ kcal/kg}$$

3. Equivalent thermique des puissances électriques des moteurs des réchauffeurs d'air et des ventilateurs de recirculation des fumées B_{Ae}

$$B_{Ae} = \frac{860(\eta_{RA} * P_{RA} + \eta_{VR} * P_{VR})}{Q_{gaz}} \quad (17)$$

Où :

η_{RA} : Rendement du moteur électrique du réchauffeur d'air.

P_{RA} : Puissance du moteur électrique du réchauffeur d'air.

η_{VR} : Rendement du moteur électrique du ventilateur de recirculation des fumées.

P_{VR} : Puissance électrique des moteurs des ventilateurs de recirculation des fumées.

Q_{gaz} : Débit du combustible.

➤ Les puissances électriques sont calculées comme suit :

$$P = \sqrt{3} * V * I * \cos \varphi \quad (18)$$

Où :

V : Tension nominale entre les phases.

I : Intensité du courant électrique.

$\cos \varphi$: Facteur de puissance nominal du moteur.

Application numérique :

- $\eta_{RA} = 0,88$
- $\eta_{VR} = 0,94$
- $V_{VR1} = V_{VR2} = 6,3 \text{ KV}$
- $V_{RA} = 0,38 \text{ KV}$
- $I_{RA} = 12 \text{ A}$
- $I_{VR1} = 13 \text{ A}$
- $I_{VR2} = 12 \text{ A}$
- $\cos \varphi = 0,8$

➤ Puissance du moteur électrique du réchauffeur d'air P_{RA} :

$$P_{RA} = \sqrt{3} * V_{RA} * I_{RA} * \cos \varphi \quad (19)$$

$$P_{RA} = \sqrt{3} * 0,38 * 12 * 0,8$$

$$P_{RA} = 6,32 \text{ KW}$$

➤ Puissance électrique des moteurs des ventilateurs de recirculation des fumées P_{VR} :

$$P_{VR} = \sqrt{3} * \cos \varphi (V_{VR1} * I_{VR1} + V_{VR2} * I_{VR2}) \quad (20)$$

$$P_{VR} = \sqrt{3} * \cos \varphi (6,3 * 13 + 6,3 * 12)$$

$$P_{VR} = 218,23 \text{ KW}$$

D'où :

$$B_{Ae} = \frac{860(0,88 * 6,32 + 0,94 * 218,23)}{36901,7}$$

$$B_{Ae} = 4,91 \text{ kcal/kg}$$

❖ Total des crédits B_{TOT}

$$B_{TOT} = PCS + B_{fe} + B_{Ae} \quad (21)$$

Application numérique :

$$B_{TOT} = 11920,154 - 9,3 + 4,91$$

$$B_{TOT} = 11915,764 \text{ kcal/kg}$$

III.1.3.4. Rendement total du générateur de vapeur par la méthode indirecte

$$\eta_{G1} = 100 - \frac{L_T * 100}{B_{TOT}} \quad (22)$$

Application numérique :

$$\eta_{G1} = 100 - \frac{1603,75 * 100}{11915,764}$$

$$\eta_{G1} = 100 - 13,46$$

$$\eta_{G1} = 86,54\%$$

Les mêmes procédures de calculs ont été suivies pour le calcul du rendement de la chaudière du groupe N°01 pour l'année 2012 et sa valeur était de :

$$\eta_{G2} = 85,07\%$$

III.1.3.5. La différence entre les deux rendements

Soit $\Delta\eta$ cette différence :

$$\Delta\eta = \eta_{G1} - \eta_{G2}$$

$$\Delta\eta = 86,54 - 85,07$$

$$\Delta\eta = 1,47\%$$

La méthode indirecte présente l'avantage d'être simple à appliquer, puisque elle ne requiert que l'analyse du combustible, la mesure de la température et l'analyse des gaz de combustion qui s'échappent de la chaudière.

Voici un tableau qui englobe toutes ces valeurs.

Tableau III.2.1 : Tableau récapitulatif des valeurs d'enthalpies de la chaudière

Points	Emplacement	Pression (bar)	Température (°C)	Débit (t/h)	Enthalpie (kcal/kg)
1	Entrée économiseur	164,4	246,3	$Q_1=488,2$	$H_1=255,57$
2	Sortie du surchauffeur N°03	145,6	540	$Q_2=523,9$	$H_2=819,32$
3	Entrée du resurchauffeur N°01	39	357,2	$Q_3=467,9$	$H_3=744,13$
4	Sortie du resurchauffeur N°02	37	540	$Q_4=467,9$	$H_4=846,17$
5	Désurchauffe des resurchauffeurs	38	351,4	$Q_5=4,6$	$H_5=741,26$
6	Désurchauffe des surchauffeurs	164,3	246	$Q_6=39,3$	$H_6=255,12$

Pour calculer le rendement par la méthode directe nous utiliserons la formule suivante :

$$\eta = \frac{Q_2 * H_2 - Q_1 * H_1 - Q_3 * H_3 + Q_4 * H_4 - Q_5 * H_5 - Q_6 * H_6}{Q_{gaz}(PCS + B_{fe} + B_{Ae})} \quad (23)$$

Où :

Q_i : Débit massique en chaque point.

H_i : Enthalpie en chaque point.

Q_{gaz} : Débit du gaz naturel.

PCS : Pouvoir calorifique supérieur du combustible.

B_{fe} : Chaleur sensible fournie par le combustible.

B_{Ae} : Équivalents thermiques des puissances électriques fournies à la chaudière.

Application numérique :

$$\eta = \left[\frac{523,9 * 819,32 - 488,2 * 255,57 - 467,9 * 744,13 + 467,9 * 846,17 - 4,6 * 741,26 - 39,3 * 255,12}{36901,7 * 11915,764} \right] * 100$$

$$\eta = 77,05$$

La valeur du rendement de la chaudière est relativement basse, et cela peut se justifier par l'incertitude des valeurs aux points 5 et 6.

Donc il est préférable de les négliger, afin d'avoir des résultats plus justes.

III.2.1 Calcul du rendement de la chaudière en négligeant les points 5 et 6

En suivant les mêmes étapes de calcul et en appliquant la même formule on aura :

$$\eta = 80,1\%$$

La vérification du rendement par la méthode directe est peu pratique à appliquer est peut être très coûteuse.

III.3. Récapitulation et interprétation des résultats

III.3.1. Interprétation des résultats

Pour mieux comparer les résultats obtenus, nous les avons mis sous forme de tableau.

Tableau III.3.1: Tableau récapitulatif des résultats obtenus par la méthode indirecte

	paramètres	Résultats de l'année 2012	Résultats de l'année 2016
Températures (°C)	T_{ref}	17,5	29
	T_{f2}	111,76	107,165
Pertes (kcal/kg)	$\dot{L}_g$	431,832	367,1256
	L_H	1257,947	1199,04
	L_{mf}	0	0
	L_{ma}	10,04	12,43
	L_{CO}	0	0
	L_B	27,107	25,16
Total	L_T	1726,926	1603,75
Crédits (kcal/kg)	PCS	11563,304	11920,154
	B_{fe}	-5,5	-9,3
	B_{Ae}	7,52	4,91
Total	B_{TOT}	11565,324	11915,764
Rendement (%)	η_G	85,07	86,54

En comparant les résultats qu'on a obtenu dans ce tableau, on remarque une diminution de toutes les pertes et crédits à l'exception de la perte due à l'humidité dans l'air (L_{ma}), qui peut se justifier par l'augmentation de l'humidité dans l'air (W_{ma}) qui en 2012 était égale à 0,012 et qu'en 2016 elle est égale à 0,017.

Concernant les températures, on remarque une hausse de la température de référence de 11,5°C comparé à l'année 2012. Le paramètre qui a influencé cette valeur est la température d'essai à la sortie des ventilateurs de soufflage (T_{A1}).

Les ventilateurs de soufflage servent à fournir l'air nécessaire à la combustion du gaz naturel.

Si la chambre de combustion du générateur de vapeur est en pression, les ventilateurs de soufflage refoulent toujours l'air de combustion, mais ils participent aussi à la circulation des gaz dans le circuit des gaz de combustion ce qui peut justifier l'augmentation de la température à la sortie des ventilateurs de soufflage et c'est ce qui a eu une influence sur la température de référence.

La diminution des pertes thermiques a été bénéfique puisque le rendement de la chaudière a augmenté, d'où la nécessité de l'entretien et de la maintenance du matériel.

III.3.2. Les paramètres influençant le rendement du générateur de vapeur

- La température des gaz de combustion est une mesure clé, qui met en évidence la plus importante perte énergétique d'une chaudière. Cette température peut être influencée par :
 - Une augmentation de l'excès d'air, entraîne une hausse de température des gaz de combustion.
 - Les infiltrations d'air dans le foyer abaissent la température des gaz de combustion, et augmentent le volume et la vitesse du gaz, ce qui diminue la transmission thermique.
- L'augmentation de la pression de service de la chaudière, conduit à l'augmentation de la température sur la paroi intérieure des tubes de la chaudière ; le taux de transmission de chaleur diminue ce qui augmente la température des gaz de combustion et les pertes.
- Le taux d'excès d'air minimal possible est fonction directe des caractéristiques de la chaudière, du brûleur et du système de régulation de la combustion et ceci a une influence sur la chaudière.
 - Une insuffisance d'excès d'air entraîne la présence de corps combustibles dans les gaz de combustion, ce qui augmente les pertes énergétiques du combustible.
 - Un excès d'air important augmente l'écoulement massique des gaz de combustion ce qui augmente les pertes.
- Des surfaces de chauffe encrassées par l'accumulation du tartre à l'intérieur des tubes de la chaudière, retardent la transmission de chaleur des gaz de combustion à l'eau de



Conclusion générale

Conclusion générale

La gestion technique d'une centrale thermique, impose un suivi rigoureux de la performance des appareils entrant dans le cycle de production d'énergie électrique ; le rendement représente le critère d'appréciation pour juger ces performances.

L'amélioration du rendement d'une centrale peut se faire par l'amélioration de l'un de ses équipements.

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.

Nos calculs ont aboutit à des résultats satisfaisants, vu qu'il y'a eu une amélioration de 1,47% du rendement du générateur de vapeur après la révision générale ce qui n'est pas négligeable. Ceci nous apprend qu'un bon fonctionnement des organes de la chaudière est assuré par un bon traitement de maintenance et une bonne exploitation de l'installation qui permet de minimiser les pertes thermiques et ainsi d'améliorer l'efficacité.

Bibliographie

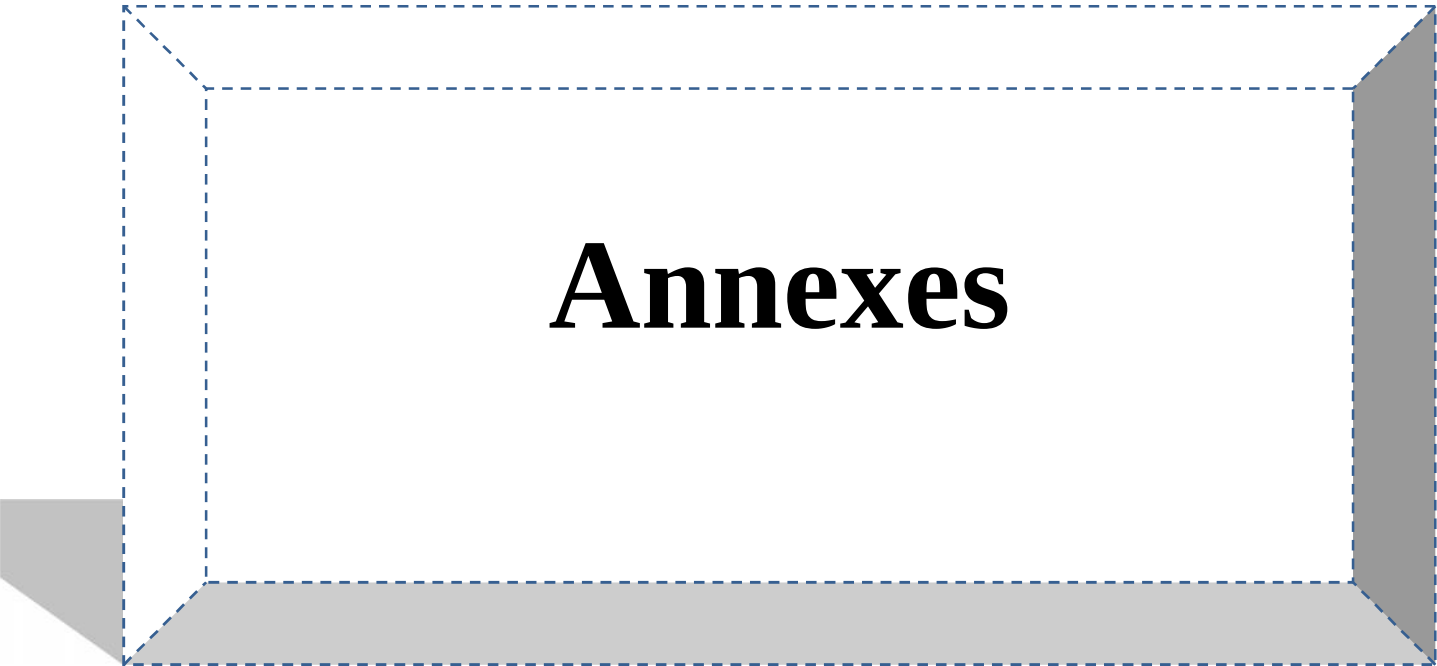
- [1]. Documentation Sonelgaz : « **Présentation de la centrale thermique de Ras Djinet** ».
- [2]. Rabie Mehira : Mémoire de Magister « **Pilotage en temps réel d'une centrale électrique à vapeur pour l'amélioration du rendement et de la consommation spécifique** », Université de Batna, 2012.
- [3]. Saada Ghersallah, Documentation Sonelgaz-SPE : « **La turbine** », Mars 2000.
- [4]. notice technique sur les centrales thermiques : Fascicule n°03 « **La vapeur d'eau** », EDF, Mars 1969.
- [5]. Ferrouk.M et Akrou.M : Mémoire d'ingénieur « **Calcul du rendement du cycle de la centrale thermique de Cap Djinet en régime normale et en régime perturbé pour une charge de 100%** », Institut national de génie mécanique de Boumerdès, Juin 1991.
- [6]. A.Bahatia: « **Improving energy efficiency of boilers systems** », PDH online course, 2012.
- [7]. Cheridi amina Lyria : Thèse de doctorat «**Etude numérique du transitoire accidentel d'uen chaudière industrielle par le code RELAP 5/ MOD 3,2** », Université Constantine 1, 2013.
- [8]. Saada Ghersallah, KWU service de formation professionnelle de la centrale thermique de Cap Djinet : « **La chaudière** », Section n°5505.
- [9]. Jean Parisot : «**Conception et calcul des chaudières généralités et bilans** », Technique de l'ingénieur. Traité de génie énergétique.
- [10]. Mahfouf Said et Mellak Youcef : Mémoire d'ingénieur « **Etude des paramètres influençant le rendement de la chaudière de la centrale de Cap Djinet** », université de Boumerdès.
- [12]. Azzaz Yazid et Harrir Ali : Mémoire de fin d'études « **Analyse de combustion appliquée à une chaudière de la centrale thermique de Ras Djinet** », université de Boumerdès, 2009.

[13]. Notice technique sur les centrales thermiques : Fascicule n°4A « Les combustibles », EDF, Edition Septembre 1961.

[14]. Documentation technique : « **Consommation spécifique de la chaudière** », Centrale de Mers El Hadjadj, Oran, Edition 24 juillet 1984.

[15]. Série de la gestion de l'énergie : « **Appareillage de chaufferie** », Canada.

[16]. The institution of Electrical Engineers: « **Power plant control and instrumentation** », London, 2005.



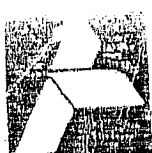
Annexes

CALCUL du Rendt Chaudière

22

A1-S/3.2

3-2



IMPIANTO CENTRALE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N. 2

COMMESSA: 16236

NUM. PAGINA: 1

DATA: 24.7.1984

FIRMA:

CONSUMATION SPECIFIQUE DE LA CHAUDIERE - CHARGE : 100%

CALCUL DU RENDEMENT DE LA CHAUDIERE AVEC LA METHODE INDIRECTE

Le rendement de la chaudière sera calculé avec les suivants pertes et credits :

PERTES :

- 1) L'_G perte de chaleur due au gaz de combustion sec)
- 2) L_{mf} perte de chaleur due à l'humidité dans le combustible alimenté
- 3) L_H perte de chaleur due à l'humidité dérivant de la combustion d'hydrogène
- 4) L_{MA} perte de chaleur due à l'humidité dans l'air
- 5) L_{CO} perte de chaleur due à la formation d'oxyde de carbone
- 6) L_B perte de chaleur due au rayonnement 2
- 7) L_D pertes diverses (bouclage) = 0.25% ^

CREDITS :

- 1) PCS est le pouvoir calorifique brut du combustible en Kcal/kg
- 2) B_{Fe} est la chaleur fournie par chaleur sensible dans le combustible en Kcal/kg
- 3) B_{Ae} c'est l'équivalent thermique des puissances électriques des moteurs des réchauffeurs d'air et des ventilateurs de recirculation des fumées en Kcal/kg

- TEMPERATURE DE REFERENCE

La température de référence sera calculé comme suit (voir par. 1.1.1):

$$T_{REF} = T_{DES} + T_{A1} - T_{AMB} \quad (^\circ C)$$

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE:
				Documentation de reference :
				AMN 114DA001 R1 SEC. IV

**ANSALDO**componenti
Divisione BREDA Generazione Vapore
DIREZIONE STUDI CALDAIEUfficio
Ingegneria
FunzionaleMODULO
R -010

IMPIANTO: CENTRALE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N. 2

COMMESSA: 16236

NUM. PAGINA: 2

DATA: 27.4.1984

FIRMA:

CONSUMATION SPECIFIQUE DE CHAUDIERE - CHARGE : 100%

où

 $T_{DES} = \text{température ambiante de projet} = 19^{\circ}\text{C}$ $T_{A1} = \text{température d'essai air de sortie du F.D.} = 29,49^{\circ}\text{C}$ $T_{AMB} = \text{température ambiante d'essai de l'air} = 21,10^{\circ}\text{C}$

$$T_{REF} = 19 + 29,49 - 21,1 = 27,39^{\circ}\text{C}$$

- Température corrigée de sortie gaz du R.A.

La température de gaz corrigée à la sortie du R.A. sera calculée avec la formule suivant (voir parag. 1.1.2) :

$$T'_{F2} = \frac{T_{REF}(T_{F1} - T_{F2}) + T_{F1}(T_{F2} - t_{A1})}{T_{F1} - t_{A1}} \quad ^{\circ}\text{C}$$

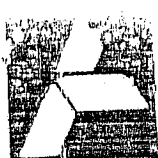
où

 $T'_{F2} = \text{température corrigée fumées de sortie du R.A.} \quad (^{\circ}\text{C})$ $T_{REF} = \text{température de projet air d'entrée au R.A.} \quad (^{\circ}\text{C})$

quand la température ambiante est $= 19^{\circ}\text{C}$
(voir parag. 1.2.1)

 $T_{F1} = \text{température d'essai fumées d'entrée au R.A.} \quad (^{\circ}\text{C})$ $T_{F2} = \text{température d'essai fumées de sortie du R.A.} \quad (^{\circ}\text{C})$ $t_{A1} = \text{température d'essai air d'entrée au R.A.} \quad (^{\circ}\text{C})$

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE:
				Documentation de reference :
				AMN 114DA001 R1 SEC. IV

**ANSALDO**componenti: ^{spc}
Divisione BREDA Generazione Vapore
DIREZIONE STUDI CALDAIEUfficio
Ingegneria
FunzionaleMODULO
R-010

IMPIANTO: CENTRALE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N. 2

COMMESSA: 16236

NUM. PAGINA: 3

CONSUMATION SPECIFIQUE DE CHAUDIERE - CHARGE : 100 %

DATA: 24.7.1984

FIRMA:

Valeur moyenne des données :

$$T_{F1} = 356.57 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{F2} = 115.16 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_{A1} = 29.49 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T'_{F2} = \frac{27.39 (356.57 - 115.16) + 356.57 (115.16 - 29.49)}{356.57 - 29.49} = 113.61^{\circ}\text{C}$$

CALCUL DES PERTES THERMIQUES

1) Perte de chaleur due au gaz de combustion sec

$$L'_G = W_G \times C_P \times (T'_{F2} - T_{REF}) \quad \text{Kcal/kg}$$

où :

 C_P = chaleur spécifique des fumées (voir appendice) W_G = kg de gaz de combustion sec/kg de combustible alimenté

$$W_G = \frac{11 \times \text{CO}_2 + 8 \times \text{O}_2 + 7 (\text{N}_2 + \text{CO})}{3 (\text{CO}_2 + \text{CO})} \times (C_b + \frac{3}{8} \text{ S})$$

 $\text{CO}_2, \text{CO}, \text{O}_2$ = analyse gaz de combustion d'essai
& vol. sec à la sortie du réchauffeur d'air C_b, S = teneur en carbone et en soufre dans le combustible (fraction
de poids de l'analyse du combustible d'essai)

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE:

COMMESSA: 16236

NUM. PAGINA: 4

DATA: 24.7.1984

FIRMA:

IMPIANTO: CENTRALE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N. 2

CONSUMMATION SPECIFIQUE DE CHAUDIERE - CHARGE : 100 %

et

T'_{F2} = température corrigée de fumées sortie R.A. (voir par. 1.2.2)

T_{REF} = température de référence corrigée (voir par. 1.2.1)

Valeur moyenne des données :

CO_2 = 9.04 % en vol.
 CO = 0 % en vol.
 O_2 = 4.57 % en vol.
 C_b = 69.4 en poid
 S = 0 en poid

$$N_2 = 100 - (CO_2 + CO + O_2) = 100 - 13.61 = 86.39 \%$$

$$T'_{F2} = 113.61 \text{ } ^\circ C$$

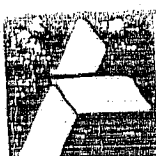
$$T_{REF} = 27.39 \text{ } ^\circ C$$

$$C_P = 0.2424 \text{ Kcal/Kg } ^\circ C$$

$$W_G = \frac{11 \times 9.04 + 8 \times 4.57 + 7 \times 86.39}{3 \times 9.04} \times 0.694 = 18.955 \text{ Kcal/kg}$$

$$L_{G'} = W_G \times C_P \times (T'_{F2} - T_{REF}) = 18.955 \times 0.2424 (113.61 - 27.39) = 396.154 \text{ Kcal/kg}$$

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE:
				Documentation de reference:
				AMN 114DA001 R1 SEC. IV

**ANSALDO**componenti
Divisione BREDA Generazione Vapore
DIREZIONE STUDI CALDAIEUfficio
Ingegneria
FunzionaleMODULO
R-010

IMPIANTO: CENTRALE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N. 2

COMMESSA: 16236

NUM. PAGINA: 5

DATA: 24.7.1984

FIRMA:

CONSUMMATION SPECIFIQUE DE LA CHAUDIERE - CHARGE : 100 %

2) Perte de chaleur due à l'humidité dans le combustible alimenté

$$L_{mf} = \frac{\text{Moist}}{100} (H_2 - H_v)$$

où

Moist = humidité dans le combustible alimenté (en % de poids depuis
l'analyse du combustible d'essai) H_2 = enthalpie de vapeur à la pression partielle de l'humidité et
 T'_{F2} (Kcal/kg) H_v = enthalpie de vapeur saturé à T_{REF} (Kcal/kg)

Valeur de l'essai :

Moist = 0

$$L_{mf} = \frac{\text{Moist}}{100} (H_2 - H_v) = 0 \quad \text{Kcal/kg}$$

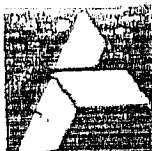
3) Perte de chaleur due à l'humidité dérivant de la combustion d'hydrogène

$$L_H = 8.936 \frac{(H)_f}{100} (H_2 - H_L)$$

où

 $(H)_f$ = teneur en hydrogène dans le combustible (% de poids depuis
l'analyse du combustible d'essai) H_2 = enthalpie de vapeur à la pression partielle de l'humidité (P_{mg}) et
 T'_{F2} (Kcal/kg) H_L = enthalpie de liquide saturé à T_{REF} (Kcal/kg)

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE:

**ANSALDO**componenti
Divisione BREDA Generazione Vapore
DIREZIONE STUDI CALDAIEUfficio
Ingegneria
FunzionaleMODULO
R-010

IMPIANTO: CENTRALE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N. 2

COMMESSA: 16236

NUM. PAGINA: 6

DATA: 24.7.1984

FIRMA:

CONSUMATION SPECIFIQUE DE LA CHAUDIERE - CHARGE : 100 %

$$P_{mg} = \frac{P_A}{1 + \frac{100 \times 1.5 \times C_b}{mg \times \{(CO_2) + (CO)\}}}$$

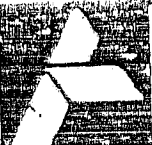
où :

 P_A = pression atmosphérique (bar) mg = kg humidité dans les fumées/kg combustible $mg = 8.936 \times H + W_{MA} \times W_A + mf + W_Z + mp$ H = teneur en hydrogène dans le combustible (en poids) except l'humidité du combustible W_{MA} = humidité absolue dans l'air (kg_{H_2O}/kg air sec) (voir pag. 9) W_A = kg d'air sec d'entrée/kg de combustible alimenté (voir pag. 9) mf = kg d'humidité du combustible/kg du combustible = 0 W_Z = kg du vapeur d'atomization/kg du combustible = 0 mp = kg d'humidité évaporée dans les cendres fondues/kg de combustible alimenté = 0

$$mg = 8.936 \times 0.2170 + 0.01058 \times 20.023 = 2.150 \text{ Kg/Kg}$$

 C_b = kg carbone/kg combustible brûlé CO_2 = depuis l'analyse du gaz de combustion (% en vol.) CO = depuis l'analyse du gaz de combustion (% en vol.)

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE:

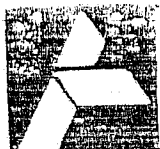
 ANSALDO componenti Divisione BREDA Generazione Vapore DIREZIONE STUDI CALDAIE	Ufficio Ingegneria Funzionale	MODULO
		R - 010
IMPIANTO: CENTRAIE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N. 2		COMMESSA: 16236
		NUM. PAGINA: 7
CONSOMMATION SPECIFIQUE DE LA CHAUDIERE - CHARGE : 100 %		DATA: 24.7.1984
		FIRMA:

$$P_{mg} = \frac{P_A}{1 + \frac{100 \times 1.5 \times C_p}{mg \{ (CO_2) + (CO) \}}}$$

$$P_{mg} = \frac{1.02004}{1 + \frac{100 \times 1.5 \times 0.694}{2.150 \times 9.04}} = 0.160 \text{ bar}$$

$$= 0.163 \text{ ata}$$

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE:

**ANSALDO**componenti
Divisione BREDA Generazione Vapore
DIREZIONE STUDI CALDAIEUfficio
Ingegneria
Funzionale

MODULO

R -010

IMPIANTO: CENTRALE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N. 2

COMMESSA: 16236

NUM. PAGINA: 8

DATA: 24.7.1984

FIRMA:

CONSUMMATION SPECIFIQUE DE LA CHAUDIERE - CHARGE : 100 %

Valeur de l'essai :

$$(H)_f = 21.70 \text{ \% en poid}$$

$$H_2 = 647.96 \text{ Kcal/Kg}$$

$$H_L = 27.41 \text{ Kcal/Kg}$$

$$L_H = 8.936 \frac{(H)_f}{100} (H_2 - H_L)$$

$$L_H = 8.936 \frac{21.7}{100} (647.96 - 27.41) = 1203.32 \text{ Kcal/kg}$$

4) Perte de chaleur due à l'humidité dans l'air

$$L_{MA} = W_{MA} \times W_A \times (H_2 - H_V)$$

où

W_{MA} = humidité absolue dans l'air (kg H₂O/kg air sec) depuis des
mesurage au psychromètre (températures boule sèche et boule
mouillée) et estimée par table psychrométriques

H_2 = enthalpie de vapeur à la pression partielle de l'humidité (P_{mg}) et
 T'_{F2} (Kcal/kg)

H_V = enthalpie de vapeur saturée à T_{REF} (Kcal/kg)

W_A = (kg d'air sec d'entrée/kg de combustible alimenté) est calculé
suivant la formule ici - a près :

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE



IMPIANTO: CENTRALE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N. 2

COMMESSA: 16236

NUM. PAGINA: 9

DATA: 24.7.1984

FIRMA:

CONSOMMATION SPECIFIQUE DE LA CHAUDIERE - CHARGE : 100 %

$$W_A = \frac{1}{0.7685} \left[\frac{28.02 \times N_2 \times (C_b + \frac{12.01}{32.07} S)}{12.01 (CO_2 + CO)} \right] \tau N$$

étant

N_2, CO_2, CO = depuis l'analyse du gaz de combustion d'essai (% de vol. sec)
à la sortie du R.A.

C_b, S, N = depuis l'analyse du combustible d'essai (fraction de poids)

valeurs moyennes des données :

N_2	=	86.39	% en vol.	}	$T_{\text{boule sèche}}$	=	21.1 °C
CO_2	=	9.04	% en vol.		$T_{\text{boule mouillé}}$	=	17.4 °C
CO	=	0	% en vol.		Humid. rel	=	67.6 %
C_b	=	69.4	en poid	}	W_{MA}	=	0.01058 Kg H_2O / Kg air
S	=	0	en poid				
N	=	8.56	en poid				

$$W_A = \frac{1}{0.7685} \left[\frac{28.02 \times 86.39 \times 0.694}{12.01 \times 9.04} - 0.0856 \right]$$

W_A = 20.023 Kg air sec/kg comb.

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE:

**ANSALDO**componenti spa
Divisione BREDA Generazione Vapore
DIREZIONE STUDI CALDAIEUfficio
Ingegneria
Funzionale

MODULO

R-010

IMPIANTO: CENTRALE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N. 2

COMMESSA: 16236

NUM. PAGINA: 10

DATA: 24.7.1984

FIRMA:

CONSUMMATION SPECIFIQUE DE LA CHAUDIERE - CHARGE : 100 %

$$W_{MA} = 0.01058 \quad \text{Kg}_{H_2O} / \text{Kg}_{air}$$

$$H_2 = 647.96 \quad \text{Kcal/Kg}$$

$$H_v = 609.46 \quad \text{Kcal/Kg}$$

$$L_{MA} = W_{MA} \times W_A \times (H_2 - H_v) =$$

$$= 0.01058 \times 20.023 (647.96 - 609.46) = 8.156 \quad \text{Kcal/Kg}$$

5) Perte de chaleur due à la formation d'oxyde de carbone

$$L_{CO} = \frac{CO}{CO_2 + CO} \times 5644 \times C_b$$

où

 CO, CO_2 = depuis l'analyse du gaz de combustion d'essai (% de vol. sec)
à la sortie du réchauffeur d'air C_b = kg de carbone brûlé/kg de combustible alimenté, depuis
l'analyse du combustible

Valeur d'essai :

$$CO = 0$$

$$CO_2 = 9.04 \quad \% \text{ en vol.}$$

$$C_b = 69.40 \quad \% \text{ en poid}$$

$$L_{CO} = 0$$

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE:

IMPIANTO: CENTRALE DE MERS-EL HADJADJ - TRANCHE N. 2	COMMESSA: 16236
	NUM PAGINA: 11
	DATA: 24.7.1984
	FIRMA:

6. Perte de chaleur due au rayonnement (voir SEC.IV par. 1.2.8)

Valeur moyenne de l'essai :

- $Q_{1C} = 523617.5 \quad \text{kg/h}$
- $h_{1C} = 817.7 \quad \text{Kcal/h}$
- $Q_{M6} = 524950.0 \quad \text{Kg/h}$
- $h_6 = 251.62 \quad \text{Kcal/kg}$
- $Q_3 = 474883.0 \quad \text{Kg/h}$
- $h_{3C} = 847.8 \quad \text{Kcal/kg}$
- $Q_2 = 473367.0 \quad \text{Kg/h}$
- $h_{2C} = 743.1 \quad \text{Kcal/kg}$
- $Q_7 = 0$
- $h_7 = 192.5 \quad \text{Kcal/kg}$
- $Q_8 = 1516.0 \quad \text{Kcal/kg}$
- $h_8 = 184.78 \quad \text{Kcal/kg}$
- $Q_{20} = 435.5 \quad \text{Kg/h}$
- $h_{20} = 667.39 \quad \text{Kcal/kg}$

$$E = (Q_{1C} h_{1C} - Q_{M6} h_6 + Q_3 h_{3C} - Q_2 h_{2C} - Q_7 h_7 - Q_8 h_8 + Q_{20} h_{20}) \times 3.968 \text{ (BTU/h)}$$

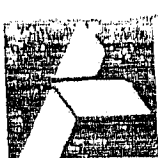
$$E = (523617.5 \times 817.7 - 524950 \times 251.62 + 474883 \times 847.8 - 473367 \times 743.1 - 1516 \times 184.78 + 435.5 \times 667.39) \times 3.968 = 346931422 \times 3.968 = 1376.6 \times 10^6 \text{ BTU/h}$$

ΔT parois - ambient = 13.4 °C (voir fig. 9, page 68 ASME PTC 4.1)
 vitesse du vent = 63.08 m/min

$$L_o = 0.23 \%$$

$$L_{B^-} = 0.23 \times \frac{76.3}{125} = 0.140 \%$$

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE:
				Pour la nomenclature voir AMN 114DAO01 R1 SEC. IV par. 2



IMPIANTO: CENTRALE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N. 2

COMMESSA: 16236

NUM. PAGINA: 12

DATA: 24.7.1984

CONSUMMATION SPECIFIQUE DE LA CHAUDIERE - CHARGE : 100 %

FIRMA:

7) Pertes diverses (bouclage)

$$L_D = 0.25 \%$$

CALCUL DES CREDITS

1) Pouvoir calorifiques brut depuis l'analyse du combustible d'essai

$$PCS = 11861.6 \text{ Kcal/kg}$$

2) Chaleur fournie par la chaleur sensible dans le combustible d'essai :

$$B_{Fe} = C_{pF} (T_{Fe} - T_{REF}) \text{ Kcal/kg}$$

où

C_{pF} = chaleur spécifique moyenne du combustible (Kcal/kg °C)

T_{Fe} = température du combustible aux brûleurs (°C)

T_{REF} = température de référence corrigée (°C)

Valeurs de l'essai :

$$T_{Fe} = 14.91 \text{ °C}$$

$$T_{REF} = 27.39 \text{ °C}$$

$$*C_{pF} = 0.477 \text{ Kcal/Kg °C}$$

$$B_{Fe} = C_{pF} (T_{Fe} - T_{REF}) \text{ Kcal/kg}$$

$$B_{Fe} = -5.953 \text{ Kcal/Kg}$$

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE:
				* Voir analyse du gaz naturel

**ANSALDO**component
Divisione BREDA Generazione Vapore
DIREZIONE STUDI CALDAIEUfficio
Ingegneria
Funzionale

R-010

IMPIANTO: CENTRALE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N. 2

COMMESSA: 16236

NUM. PAGINA: 13

DATA: 24.7.1984

FIRMA:

CONSUMATION SPECIFIQUE DE LA CHAUDIERE - CHARGE : 100%

3) Equivalent thermique des puissances electriques

Equivalent thermique des puissances electriques des moteurs des
réchauffeurs d'air et des ventilateurs de remise en circulation
des fumées :

$$B_{Ae} = \frac{860 (\eta_{RA} \times P_{RA} + \eta_{VR} \times P_{VR})}{Q_G}$$

où :

 η_{RA} = rendement (nominale) du moteur électrique R.A. P_{RA} = puissance moteur électrique R.A. (Kw) η_{VR} = rendement (nominale) moteur électrique du ventilateur de
récirculation fumées P_{VR} = puissance électrique moteur du ventilator récirculation des
fumées (Kw) Q_G = debit du gaz naturel combustible (kg/h)

étant les puissances électriques calculées avec la relation suivante :

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \psi$$

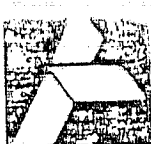
où :

 V = tension nominale entre les phases (kV) I = courant de phase absorbé (A) $\cos \psi$ = facteur de puissance nominale du moteur

Valeur moyenne de l'essai :

 $V_{RA} = 0.380$ kV $I_{RA} = 26$ A $\cos \psi_{RA} = 0.8$

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE:



IMPIANTO CENTRALE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N. 2

COMMESSA: 16236

NUM. PAGINA: 14

DATA: 24.7.1984

FIRMA:

CONSUMATION SPECIFIQUE DE LA CHAUDIERE - CHARGE : 100%

$$V_{VR} = 6.600 \text{ kV}$$

$$I_{VR} = 16.14 \text{ A}$$

$$\cos \phi_{VR} = 0.8$$

$$P_{RA} = \sqrt{3} \times 26 \times 0.380 \times 0.8 = 13.69 \text{ kW}$$

$$P_{VR} = \sqrt{3} \times 16.14 \times 6.600 \times 0.8 = 147.604 \text{ kW}$$

$$Q_G = 33650 \text{ kg/h}$$

$$B_{Ae} = \frac{860 (\eta_{RA} \times P_{RA} + \eta_{VR} \times P_{VR})}{Q_G}$$

$$B_{Ae} = \frac{860 (0.88 \times 13.69 + 0.94 \times 147.604)}{33650} = 3.854 \text{ Kcal/kg}$$

Total des credits :

$$B_{TOT} = PCS + B_{fe} + B_{Ae} = 11861.6 - 5.953 + 3.854 = 11859.50 \text{ Kcal/kg}$$

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE:

IMPIANTO: CENTRALE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N. 2

COMMESSA: 15236

NUM. PAGINA: 15

DATA: 24.7.1984

CONSUMMATION SPECIFIQUE DE LA CHAUDIERE - CHARGE : 100%

FIRMA:

PERTES DE CHALEUR %

1) L'_G	$(396.154/11859.50) \times 100$	3.34	%
2) L_{mf}	0	0	%
3) L_H	$(1203.32/11859.50) \times 100$	10.15	%
4) L_{MA}	$(8.156/11859.50) \times 100$	0.07	%
5) L_{CO}	0	0	%
6) L_B		0.14	%
7) L_D		0.25	%
		13.95	%

Rendement de la chaudière avec la méthode indirecte :

$$\eta_G = 100 - 13.95 = 86.05 \%$$

Corrections depuis les conditions d'essai jusqu'à celles de garantie

A) Caractéristique du combustible (PF 163 rev. 02)

valeurs de l'essai :

PCS = 11861.6 Kcal/kg

H_2 = 21.70 %

$$\Delta \eta_A = 0.09 \%$$

B) Température eau alimentée (PF 198 - diag. 1)

$$\Delta \eta_B = 0.00 \%$$

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE:

IMPIANTO: CENTRALE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N. 2
 CONSOMMATION SPECIFIQUE DE LA CHAUDIERE - CHARGE : 100%

COMMESSA: 16236
 NUM. PAGINA: 16
 DATA: 24.7.1984
 FIRMA:

C) température vapeur entrée RH (PF 198 diag. 2)

$$\Delta \eta_c = 0.00 \%$$

D) débit vapeur SE (PF 199 - diag. 3)

$$\Delta \eta_D = 0.03 \%$$

E) débit vapeur RE (PF 199 - diag. 4)

$$\Delta \eta_E = 0.01 \%$$

F) humidité air ambiante (PF 202 - diag. 5)

$$\Delta \eta_F = 0.00 \%$$

G) vitesse du vent

$$\Delta \eta_G = \frac{K_1 - K_2}{125} \quad L_0 = 0.03 \%$$

Rendement corrigée de la chaudière avec la méthode indirecte :

$$\eta_{G, \text{corr}} = 86.05 + 0.09 + 0.00 + 0.00 + 0.03 + 0.01 + 0.00 + 0.03 = 86.05 + 0.16 = 86.21 \%$$

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE:



IMPIANTO: CENTRALE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N.

COMMESSA: 16236

NUM. PAGINA: 17

DATA: 24.7.1984

FIRMA:

CONSUMATION SPECIFIQUE DE LA CHAUDIERE - CHARGE : 100 %

CALCUL DU RENDEMENT DE LA CHAUDIERE AVEC LA METHODE DIRECTE

$$\eta'_G = \left[\frac{Q_{1C} h_{1C} - Q_{M6} h_6 + Q_3 h_{3C} - Q_2 h_{2C} - Q_7 h_7 - Q_8 h_8 + Q_{20} h_2}{Q_G (PCS + B_{Fe} + B_{Ae})} \right] \times 100$$

$$\eta'_G = \frac{346.9 \times 10^6}{33650 (11861.6 - 5.953 + 3.854)} \times 100 = 86.93\%$$

Corrections depuis les conditions d'essai jusqu'à celles de garantie

A) Caractéristique du combustible (PF 163 rev. 02)

valeurs de l'essai :

PCS = 11861.6 Kcal/kg

H₂ = 21.70 %

$$\Delta \eta_A = 0.09 \%$$

B) Température eau alimentée (PF 198 - diag. 1)

$$\Delta \eta_B = 0.00 \%$$

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE:

COMMESSA: 16236

NUM. PAGINA: 18

DATA: 24.7.1984

FIRMA:

IMPIANTO: CENTRALE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N. 2

CONSUMATION SPECIFIQUE DE LA CHAUDIERE - CHARGE : 100%

C) température vapeur entrée RE (PF 198 diag. 2)

$$\Delta \eta_c = 0.00 \%$$

D) débit vapeur SH (PF 199 - diag. 3)

$$\Delta \eta_D = 0.03 \%$$

E) débit vapeur RE (PF 199 - diag. 4)

$$\Delta \eta_E = 0.01 \%$$

F) humidité air ambiante (PF 202 - diag. 5)

$$\Delta \eta_F = 0.00 \%$$

G) vitesse du vent

$$\Delta \eta_G = \frac{K_1 - K_2}{125} \quad L_0 = 0.03 \%$$

H) Température ambiante (PR. 2726 R.02)

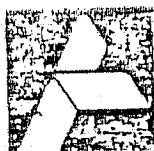
$$T_{AMB} = 21.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta \eta_H = -0.03 \%$$

Rendement corrigée de la chaudière avec la méthode directe :

$$\eta'_{G, \text{corr}} = 86.93 + 0.09 + 0.00 + 0.00 + 0.03 + 0.01 + 0.00 + 0.03 - 0.03 = 86.93 + 0.13 = 87.06\%$$

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE:

**ANSALDO**componenti
Divisione BREDA Generazione Vapore
DIREZIONE STUDI CALDAIEUfficio
Ingegneria
Funzionale

MODULO

R - 010

IMPIANTO: CENTRALE DE MERS-EL-HADJADJ - TRANCHE N. 2

COMMESSA: 16236

NUM PAGINA: 19

DATA: 24.7.1984

FIRMA:

CONSUMMATION SPECIFIQUE DE LA CHAUDIERE - CHARGE : 100%

ECART entre les rendements de la chaudière calculés avec la méthode
directe et indirecte:

méthode directe = 87.06%

méthode indirecte = 86.21 %

$$\Delta \eta = 87.06 - 86.21 = 0.85\%$$

REV.	DATA	VISTO	DESCRIZIONE	NOTE: