

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

Etude exergétique d'une centrale thermique à vapeur

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : MASTER

SPECIALITE : ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENT

PRESENTE PAR : CHELBI MONCEF ELISLEM

DIRECTEUR DU MEMOIRE : PR. SARI MOHAMED RAFIK

DEVANT LE JURY

PRESIDENT: PR. MERZOUGE B

UBM-ANNABA

EXAMINATEURS :

Dr. MECHIGHEL F

UBM-ANNABA

Mr. KADRI S

UBM-ANNABA

Année : 2016/2017

Etude exergétique d'une centrale thermique à vapeur

Résumé

De nos jours, il est établi que la demande en matière d'énergie est devenue très importante. En contre partie, les coûts de production de l'énergie sont très élevés, ce qui nécessite une bonne compréhension des moyens de production. Parmi ces moyens, les centrales thermiques à vapeur sont très utilisées.

Il est également bien établi, que les centrales énergétiques sont le siège de multiples transformations et transferts thermodynamiques. Au cours de ces évolutions, des pertes thermodynamiques se produisent. La question qui se pose alors est comment minimiser ces pertes.

Dans ce mémoire, nous proposons de faire un bilan exergétique d'une installation thermique à vapeur. L'objectif principal est de donner un véritable «diagnostic» concernant l'état thermodynamique de la centrale étudiée. Les pertes exergétiques, ainsi que le rendement global de la centrale sont évalués et discutés.

Mots Clés : Centrale thermique - Approche énergétique - Approche exergétique - Pertes - Rendement.

Remerciements

Je remercie avant tout, notre Dieu qui nous a éclairé la bonne voie et nous a aidés à la parcourir.

Je tiens à exprimer no vif remerciement à promoteur (Pr : Sari Mohamed Rafik), pour nous avoir proposé ce sujet, leurs précieux conseils tout au long de notre travail, son aide et sa confiance.

Nous remercions très chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner notre travail.

Nous exprimons nos profondes reconnaissances à tous les enseignants De l'université de BADJI MOKHTAR, et en particulier nos enseignants de l'énergétique et environnement, pour le savoir qu'ils nous ont transmis, pour leur disponibilité et leur gentillesse durant ces deux dernières années.

Nous aimerions adresser du fond du cœur nos plus fervents remerciements à nos parents, car nul autres qu'eux se sont plus sacrifiés pour notre bien et l'accomplissement de nos projets. Ils ont fait de nous ce que nous sommes aujourd'hui.

Enfin, tous nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce modeste travail. Nous leurs sommes très reconnaissants.

Chelbi Moncef Elislem

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ma très chère mère, à mon père que j'adore, à mes frères, et mes sœurs. Que Dieu les donne longue vie et une bonne santé.

Pour tous les membres de la famille Que Dieu les garde et protège.

Aussi, je cite tous les professeurs et enseignants qui ont participé à ma formation de l'Ecole primaire à l'université de Badji Mokhtar et qui ont plantés et arrosés dans mon esprit l'arbre de la science. .

A tous mes amis et tous les étudiants de l'université de Badji Mokhtar. Je leur souhaite à tous de très beaux succès dans la vie. A tous mes amis et tous les étudiants de l'université de Badji Mokhtar. Je leur souhaite à tous de très beaux succès dans la vie.

Je dédie enfin ce travail à tous ceux qui me sont chers, que j'aime et qui m'aiment

Sommaire

Nomenclature:	1
Introduction Générale:	4

Chapitre I

Généralité sur les centrales énergétiques

I.1- Introduction :	6
I.2- Généralités :	6
I.2.1- Les Centrales Nucléaires:	6
I.2.1-1. Introduction :	6
I.2.1-2. Histoire :	6
I.2.1-3. Uranium :	6
I.2.1-4. Le Fonctionnement d'une centrale nucléaire :	7
A/ Description :	7
B/ Fonctionnement :	8
I.2.1-5. Inconvénients des centrales nucléaires :	8
I.2.1-6. Avantages des centrales nucléaires :	8
I.2.2- Les centrales hydrauliques :	9
I.2.2-1. Définition :	9
I.2.2-2. Le Fonctionnement d'une Centrale Hydraulique :	9
I.2.2-3. Avantages :	10
I.2.2-4. Inconvénients :	10
I.2.3- Centrale éolienne :	11
I.2.3-1. Historique :	11
I.2.3-2. Fonctionnement :	11
I.2.3-4. L'implantation d'une éolienne nécessite:	12
I.2.3-5. Avantages:	12
I.2.3-6. Inconvénients:	12
I.2.3- Les centrales solaires :	12
I.2.3-1. Les Avantages :	13
I.2.3-2. Les Inconvénients :	13
I.2.4- les Centrales Thermiques :	14
I.2.4-1. Définition :	14
I.2.4-2. Principe de fonctionnement d'une centrale thermique :	14
I.2.4-3. Description des principes organes d'une centrale thermique :	16
I.2.4.3-1. Turbine à vapeur :	16
I.2.4.3.1. a- Définition :	16
I.2.4.3.1. b- Historique :	16
I.2.4.3.1. c- Différentes catégories des turbines :	16
I.2.4.3.1. d- Description de la turbine à vapeur :	16
I.2.4.3.1. e- Principe de fonctionnement :	17

I.2.4.3.2- Chaudière :	18
I.2.4.3.2 .a- Introduction :	18
I.2.4.3.2 .b- Principe de fonctionnement d'une chaudière:	19
I.2.4.3.3- Condenseur :	19
I.2.4.3.3 .a- Introduction :	19
I.2.4.3.3.b- Classification des condenseurs :	20
I.2.4.3.3.c- Principe de fonctionnement :	20
I.3- Conclusion :	20

Chapitre II

Description des approches énergétiques et exergetiques

II.1- Introduction :	22
II.2. Approche énergétique :	22
II.2.1- Notion d'énergie :	22
II.2.1.1- Energie ordonnée :	22
II.2.1.2- Energie désordonnée :	22
II.2.2- Bilan énergétique :	23
II.2.2.1- Notion de réseaux :	25
II.2.2.2- Efficacité :	26
II.2.2.3- Efficacité d'un système :	27
II.2.4- Installation motrice :	27
II.3- Approche exergetique :	28
II.3.1- Bilan exergetique :	28
II.3.1.1- Terminologie et symbolisme :	30
II.3.1.2- Coenthalpie :	31
II.3.1.2. a- Définition :	31
II.3.1.3- Expression générale :	32
II.3.1.4 - Perte exergetique :	32
II.3.1.4. a – Définition :	33
II.3.1.4. b – Dissipation :	33
II.3.1.5- Rendement exergetique :	35
II.3.1.5. a- Définition :	35
II.3.1.6- Transfert-chaleur avec chute de température :	35
II.4- Conclusion :	37

Chapitre III
Etude exergetique d'une centrale thermique à vapeur

III.1-Introduction :	39
III.2- Analyse exergetique principaux composants d'une centrale thermique à vapeur :	39
III.2. 1-Analyse exergetique de la turbine à vapeur :	39
III.2.1.1- Bilan exergetique de la turbine :.....	39
III.2.1.1.a- La perte exergetique dans la turbine :.....	40
III.2.1.1.b- Le rendement exergetique dans la turbine:	40
III.2.2-Analyse exergetique du réchauffeur à surface :	41
III.2.2.1- Bilan exergetique du réchauffeur :	41
III.2.2.1.a- La perte exergetique dans le réchauffeur :	42
III.2.2.1.b- Le rendement exergetique du réchauffeur:	42
III.2.3-Analyse exergetique du condenseur :	43
III.2.3.1- Bilan exergetique du condenseur :	43
III.2.3.1.a - La perte exergetique dans le condenseur:	43
III.2.3.1.b - le rendement exergetique du condenseur:	43
III.2.4-Analyse exergetique de la chaudière :	44
III.2.4.1 - Bilan exergetique de la chaudière :	44
III.2.4.1.a- la Perte exergetique dans la chaudière:	45
III.2.4.1.b- le rendement exergetique du chaudière:	45
III.2.5- La perte totale \dot{L}_t dans l'installation :	45
III.2.5. a - contribution de la perte au niveau du condenseur :.....	45
III.2.5. b - contribution de la perte au niveau de la turbine:.....	45
III.2.5. c - contribution de la perte au niveau du réchauffeur (2) :.....	45
III.2.5. d- contribution de la perte au niveau du réchauffeur (1) :.....	45
III.2.5. e- contribution de la perte au niveau de la chaudière :.....	46
III.2.6 - Le rendement exergetique totale d'une centrale :	46
III.2.7 - Le rendement énergetique d'une centrale :	46
III.3- Description de la centrale étudiée :	46
III.3.1 – schéma de principe de la centrale :	47
III.3.2 - Principe de fonctionnement d'une centrale :	48
III.4- Analyse exergetique des différents composants de la centrale étudiée :	49
III.4.1- Bilan de la Date 1 :	49
III.4.1.1 - Propriétés thermodynamique :	49
III.4.1.2 - Diagramme (T – S) :	50
III.4.1.3 - Bilan exergetique de la turbine à vapeur :	51
III.4.1.3.a - la Perte exergetique dans la turbine :	51
III.4.1.3.b - Le rendement exergetique dans la turbine :	52

III.4.1.4-Bilan exergetique d'un Rechauffeur 2 :	52
III.4.1.4.a - La perte exergetique dans le rechauffeur 2 :	53
III.4.1.4.b - Le rendement exergetique du rechauffeur 2 :	53
III.4.1.5-Bilan exergetique d'un Rechauffeur 1 :	53
III.4.1.5.a - La perte exergetique dans le rechauffeur :	54
III.4.1.5.a - Le rendement exergetique du rechauffeur :	54
III.4.1.6 - Bilan exergetique de la chaudiere :	54
III.4.1.6.a - La perte exergetique totale dans la chaudiere :	55
III.4.1.6.b - Le rendement exergetique de la chaudiere :	56
III.4.1.7 -Bilan exergetique du condenseur :	56
III.4.1.7.a - La perte exergetique dans le condenseur:	57
III.4.1.7.b - Le rendement exergetique du condenseur :	57
III.4.1.8 - Bilan exergetique de la Pompe d'extraction :	57
III.4.1.9 - Bilan exergetique de la Pompe alimentaire:	57
III.4.1.10 - La perte totale \dot{L}_t :	58
III.4.1.10.a – contribution de la perte au niveau du condenseur :	58
III.4.1.10.b – contribution de la perte au niveau de la turbine:	58
III.4.1.10.c – contribution de la perte au niveau du rechauffeur (2) :	58
III.4.1.10.d – contribution de la perte au niveau du rechauffeur (1) :	58
III.4.1.10.e – contribution de la perte au niveau du la chaudiere :	59
III.4.1.11. Le rendement exergetique totale de la centrale thermique etudiee :	59
III.4.1.12 - Le rendement energetique total de la centrale thermique etudiee	59
III.4.1- Bilan de la Date 2 :	60
III.4.1.1 - Proprietes thermodynamique :	60
III.4.1.2 - Diagramme (T – S) :	61
III.4.1.3 - Bilan exergetique d'une turbine a vapeur :	62
III.4.1.3.a - la Perte exergetique dans la turbine :	62
III.4.1.3.b - Le rendement exergetique dans la turbine :	63
III.4.1.4-Bilan exergetique d'un Rechauffeur 2 :	63
III.4.1.4.a - La perte exergetique dans le rechauffeur 2 :	64
III.4.1.4.b - Le rendement exergetique du rechauffeur 2 :	64
III.4.1.5-Bilan exergetique d'un Rechauffeur 1 :	64
III.4.1.5.a - La perte exergetique dans le rechauffeur 1 :	65
III.4.1.5.a - Le rendement exergetique du rechauffeur 1:	65
III.4.1.6 - Bilan exergetique de la chaudiere :	65
III.4.1.6.a - La perte exergetique totale dans la chaudiere :	66
III.4.1.6.b - Le rendement exergetique de la chaudiere :	66

III.4.1.7 -Bilan exergetique du condenseur :	67
III.4.1.7.a - La perte exergetique dans le condenseur:	67
III.4.1.7.b - Le rendement exergetique du condenseur :	68
III.4.1.8 - Bilan exergetique d'un Pompe d'extraction :	68
III.4.1.9 - Bilan exergetique d'un Pompe alimentaire:	68
III.4.1.10 - La perte totale \dot{L}_t :	68
III.4.1.10.a – contribution de la perte au niveau du condenseur :	69
III.4.1.10.b – contribution de la perte au niveau de la turbine:	69
III.4.1.10.c – contribution de la perte au niveau du rechauffeur (2) : ...	69
III.4.1.10.d – contribution de la perte au niveau du rechauffeur (1) :.....	69
III.4.1.10.e – contribution de la perte au niveau du la chaudiere :	69
III.4.1.11. Le rendement exergetique total de la centrale thermique etudiee :	69
III.4.1.12 - Le rendement energetique total de la centrale thermique etudiee	70
III.4.3.1 - Tableaux recapitulatifs des calculs :	71
III.4.4 - Interpretation des resultats :	72
III.5- Conclusion :	73
<u>Conclusion Generale :</u>	<u>74</u>
References Bibliographiques :	75
Liste des figures :	76
Liste des tableaux :	77

NOMENCLATURE

\dot{E}^- : puissance-travail donnée par le système.	en [W]
\dot{E}_{eK}^+ : la puissance-travail effective fournie système	en [W]
\dot{E}_k^+ : puissance-travail reçue par le système, d'un système k, autre que l'atmosphère	en [W]
\dot{E}_{yn}^+ : copuissance-transformation reçue au niveau du réseau d'écoulement n	en [W]
E_{max}^- : travail maximal	en [J]
\dot{E}_p^+ : la puissance électrique des moteurs de la pompe à combustible, du ventilateur de soufflage et du ventilateur du tirage	en [W]
E_q^+ : <i>cotavail – chaleur</i> reçue	en [J]
\dot{E}_q^+ : copuissance – chaleur reçue	en [W]
\dot{E}_{qa}^+ : exergie-chaleur reçue du corps chaud	en [W]
\dot{E}_{qi}^+ : copuissance -chaleur reçue de la source à température T_i	en [W]
\dot{E}_t^- : puissance transformation donnée par la turbine	en [W]
\dot{E}_w^+ : la copuissance transformation reçue par le système	en [W]
\dot{E}_{we}^- : la copuissance transformation du réseau d'eau principal.	en [W]
\dot{E}_{w0}^+ : le pouvoir exergetique exprimé en puissance	en [W]
\dot{E}_{wv}^+ : la copuissance transformation reçu par le condenseur au niveau du circuit vapeur.	en [W]
E_y^+ : <i>cotavail – transformation</i> reçue	en [J]
\dot{E}_y^+ : copuissance – transformation reçue	en [W]
$\dot{E}_{q\beta}^-$: exergie-chaleur donnée au corps froid	en [W]
J_{cz} : coénergie totale	en [J]
j_{cz} : coénergie totale massique	en $\left[\frac{J}{kg}\right]$
h_{czj} : enthalpie totale massique du fluide au droit de la section j	en $\left[\frac{J}{kg}\right]$
K : coenthalpie total massique	
K_{cz} : coenthalpie totale	en [J]
k_{cz} : coenthalpie totale massique	en $\left[\frac{J}{kg}\right]$
L : perte exergetique en énergie	en [J]
\dot{L} : perte exergetique en puissance	en [W]
\dot{L}_t : la perte totale exergetique	en [W]

\dot{M}_j^+ : débit-masse reçu par le système, en une section j , d'un système externe j	en	$\left[\frac{kg}{s}\right]$
P_a : pression atmosphérique	en	$[Par]$
P_0 : pression de référence	en	$[Par]$
\dot{Q}_a^+ : puissance-chaleur reçue par le système, de l'atmosphère	en	$[W]$
\dot{Q}_a^- : puissance – chaleur donnée à l'atmosphère	en	$[W]$
$Q_{\alpha\beta}$: énergie-chaleur transférée du corps α au corps β	en	$\left[\frac{J}{kg}\right]$
\dot{Q}_C : le pouvoir énergétique exprimé en puissance	en	$[W]$
\dot{Q}_i^+ : puissance-chaleur reçue par le système, d'un système i , autre que l'atmosphère	en	$[W]$
\dot{Q}_h^+ : puissance – chaleur reçue par la chaudière	en	$[W]$
δR : dissipation due à un frottement visqueux.		
S : entropie du système.	en	$\left[\frac{J}{kg K}\right]$
s_j : entropie massique du fluide au droit de la section j .	en	$\left[\frac{J}{kg K}\right]$
\dot{S}^i : entropie due aux opérations internes irréversibles, c'est-à-dire simplement aux irréversibilités du système. Elle caractérise la création d'entropie.	en	$\left[\frac{J}{kg K}\right]$
T : température à laquelle se produit le frottement	en	$[C^\circ]$
T_0 : Température de référence	en	$[C^\circ]$
T_α : température du corps chaud	en	$[C^\circ]$
T_β : température du corps froid	en	$[C^\circ]$
T_h : température un réseau de chauffage	en	$[C^\circ]$
U_e : énergie effective	en	$\left[\frac{J}{kg}\right]$
U_{ecz} : énergie effective totale.	en	$\left[\frac{J}{kg}\right]$
\dot{Y}^+ : puissance – transformation.	en	$[W]$
Y_n^+ : l'énergie-transformation reçue au niveau du réseau n .	en	$\left[\frac{J}{kg}\right]$
Δh_{0i} : le pouvoir énergétique du combustible B , référé à P_0 et T_0 . En		$\left[\frac{J}{kg}\right]$

Symboles grecques

ε_m : efficacité

θ : facteur de Carnot

Ψ : représente les pertes exergétiques, en valeur relative

η : rendement exergétique

Introduction Générale

Dans nos jours, il y a une demande accrue en matière d'énergie, mais les coûts de la production sont très élevés, ce qui nécessite une bonne compréhension du fonctionnement des équipements énergétiques qui la produisent.

Il est établi que les centrales énergétiques sont le siège de multiples transformations et transferts thermodynamiques. Au cours de ces évolutions, des pertes thermodynamiques se produisent. Le souci majeur des industriels est donc de minimiser ces pertes.

L'analyse énergétique classique basée sur le premier principe de la thermodynamique semble inappropriée pour caractériser les pertes thermodynamiques au niveau des équipements énergétiques. En effet, si on désire de la perfection et par conséquent la qualité thermodynamique, l'analyse exergétique peut être utilisée comme complément à l'analyse énergétique.

L'exergie est essentiellement fondée sur la combinaison du premier et du second principe de la thermodynamique. Par ailleurs, le second principe fait intervenir la notion d'entropie. Cette dernière nous renseigne clairement sur les irréversibilités thermodynamiques d'un système. En effet, un bilan exergétique permettra d'évaluer correctement les pertes thermodynamiques du système et de donner toutes les informations sur la dégradation de l'énergie. L'analyse exergétique permet donc d'exprimer avec exactitude le rendement thermodynamique et d'avoir par conséquent la qualité thermodynamique souhaitée.

Le travail présenté dans ce mémoire s'articule essentiellement autour de trois chapitres organisés comme suit :

Dans le premier chapitre, sont exposés d'une manière détaillée les différents types des centrales énergétiques (thermique, éolienne, solaire et hydraulique).

Dans le second chapitre, nous nous sommes intéressés à la description des approches énergétique et exergétique. L'approche énergétique est principalement basée sur le premier principe, tandis que l'approche exergétique combine entre le premier principe et le second principe de la thermodynamique.

Le troisième et dernier chapitre du mémoire concerne l'application de la théorie de l'exergie sur une installation motrice à vapeur. En effet, on a choisi comme champs d'application la centrale thermique à vapeur de l'unité 10 GL1/K au niveau de l'entreprise Sonatrach-Skikda. Dans cette partie, on a évalué les pertes exergétiques, ainsi que le rendement exergétique global pour deux dates différentes.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

I.1-Introduction :

Une centrale énergétique est le point de départ de notre consommation d'énergie. Il existe différents types de centrales énergétiques. Dans ce chapitre, nous détaillerons les plus importantes.

I.2-Généralités :

I.2.1- Les Centrale Nucléaire

I.2.1-1.Introduction :

La production mondiale d'électricité dans le monde par le nucléaire est de 16 %. La principale source d'énergie électrique dans le monde reste le thermique à flamme, ce qui est mauvais pour l'atmosphère (émissions de CO₂). Le 16 mai 2007, 437 réacteurs nucléaires sont en fonctionnement dans le monde. Trente centrales sont en cours de construction, soit un gain de 6 %. Le nucléaire est une énergie en développement dans le monde, tout particulièrement en Asie [1].

I.2.1-2.Histoire :

Le 27 juin 1954, la première centrale nucléaire civile fut connectée au réseau électrique à Obninsk en Union soviétique, avec une puissance de production électrique de 5 Mégawatts. En 1956, plusieurs centrales nucléaires furent aménagées en France, en Angleterre et aux États-Unis. En 1957, les travaux de construction du premier réacteur pour usage civile en France (EDF1) démarrèrent à la centrale nucléaire de Chinon.

La puissance nucléaire mondiale a augmenté rapidement au fil des années, s'élevant à plus de 1 Gigawatt (GW) en 1960, allant jusqu'à 366 GW en 2005.

Plus des deux tiers des centrales nucléaires commandées après janvier 1970 ont été annulés. Pour cause : les coûts économiques croissants, dus aux durées de construction de plus en plus longues, ont rendu le nucléaire moins compétitif dans les années 1980 et 1990. Par ailleurs, dans certains pays les risques d'accidents nucléaires et les problèmes des déchets radioactifs, ont conduit certains pays à renoncer à l'énergie nucléaire [1] .

I.2.1.3- Uranium

A l'état pur, l'uranium solide est un métal radioactif gris et blanc (voire argenté) qui rappelle la couleur du nickel. Il est dur et très dense. De plus, l'uranium est l'atome le plus lourd (qui contient le plus de nucléons) présent naturellement sur la Terre.

Après son extraction, le minerai d'uranium est broyé, traité, affiné et dans certain cas, enrichi avant de servir à la fabrication de combustible nucléaire.

L'exploitation de l'uranium comporte certains atouts, comme les revenus de l'exportation et la création d'emplois. Cependant, les effets négatifs de l'exploitation sur l'environnement, l'économie et la santé l'emportent sur ses avantages.

L'uranium est dangereux, lorsqu'il se désintègre, il émet de l'énergie et se transforme en substances diverses qui se désintègrent à leur tour en produisant de l'énergie radioactive. Ces matières émettent des radiations de faible intensité capables de pénétrer les cellules et de modifier les molécules nécessaires à un fonctionnement normal. C'est ce qui pose le risque le plus important pour la santé [1].

I.2.1.4- Le fonction d'une centrale nucléaire :

A- Description :

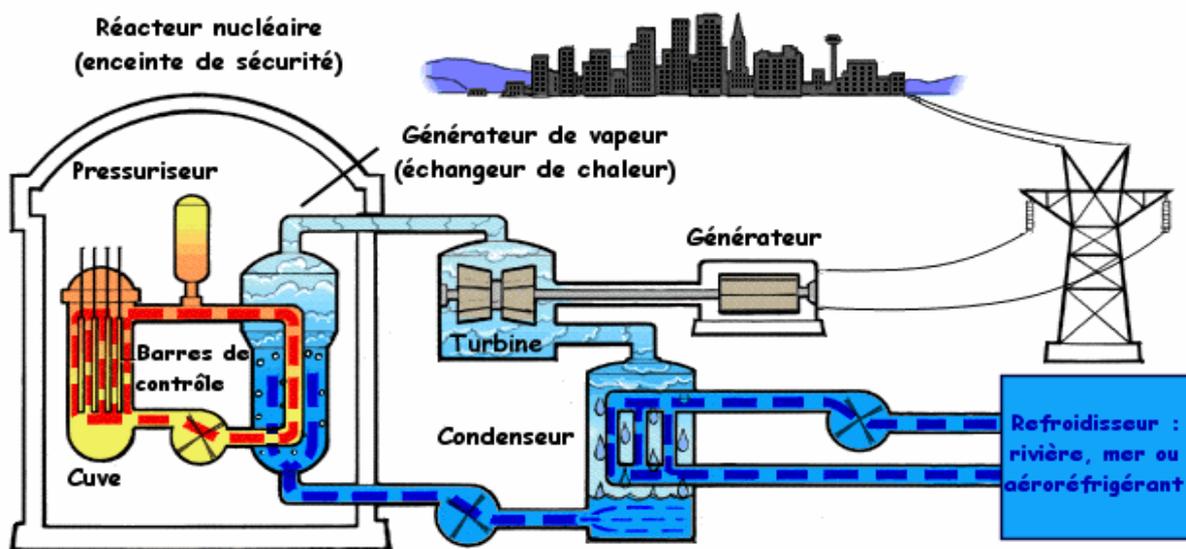


Fig. 1.1 Schéma d'une centrale nucléaire [1].

Une centrale nucléaire (Fig. 1.1) regroupe l'ensemble des installations permettant la production d'électricité. Elle comprend plusieurs tranches, chaque tranche correspondant à un groupe d'installation conçu pour fournir une puissance électrique donnée (900Mwe; 1300MWe....).

Une tranche comprend généralement :

- Le bâtiment réacteur.
- une enceinte étanche qui contient le réacteur nucléaire.

- les générateurs de vapeur (3 ou 4 selon la génération).
- un pressurisé.
- une partie d'un circuit d'eau secondaire et le circuit d'eau primaire [1].

B- Fonctionnement :

L'uranium est enfermé à l'intérieur de gaines métalliques étanches. C'est dans ces gaines que se produit la fission d'uranium. L'eau dans le cœur se réchauffe au contact de ces éléments combustibles. Cette eau, à la sortie de la cuve, cède sa chaleur à l'eau d'un second circuit, par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur. Une fois refroidie, elle retourne dans le cœur à l'aide d'une pompe. Cette eau est chauffée à 320°C et est maintenue à une pression de 155 atmosphères afin de rester à l'état liquide. Dans le générateur de vapeur, l'eau du circuit secondaire se transforme en vapeur au contact des tubes parcourus par l'eau à 320° du circuit primaire. Cette vapeur fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur. A la sortie de la turbine, la vapeur se transforme en eau dans le condenseur, avant d'être renvoyée au générateur de vapeur. De l'eau en provenance de l'aéroréfrigérants traverse le condenseur par des milliers de tubes. La vapeur en provenance de la turbine se condense au contact de ces tubes froids. L'eau contenue dans ces tubes va se réchauffer d'une dizaine de degrés : cette eau tiède (30-35°) est refroidie par le courant d'air dans l'aéroréfrigérants avant de repartir vers les tubes du condenseur. Un panache de vapeur d'eau générée par la différence de température entre l'air et l'eau s'échappe de la tour de refroidissement [1].

I.2.1.5- Inconvénients des centrales nucléaires :

- Exigence de la fermeture des sites dangereux ou la restauration de la résistance des installations.
- les déchets hautement radioactifs renferment des cendres et des résidus issus des combustibles irradiés en réacteurs : ces déchets concentrent 90 % de la radioactivité

I.2.1.6- Avantages des centrales nucléaires :

- Le nucléaire permet de produire de l'électricité peu coûteuse et ce, sans polluer l'atmosphère.
- La consommation électrique augmentant sans cesse depuis 30 ans, seul le nucléaire peut pour l'instant subvenir à nos besoins.
- Grâce à une nouvelle génération de centrales nucléaires, la sûreté sera améliorée et la production des déchets radioactifs à vie longue sera réduite [1].

I.2.2- Les centrales hydrauliques :

I.2.2.1- Définition :

Le déplacement de l'eau constitue une énergie qu'on peut exploiter. Ainsi, les centrales hydrauliques produisent de l'électricité à partir de cette énergie. L'eau est canalisée jusqu'à une turbine. Sous la pression de l'eau sur les ailettes, la turbine se met à tourner et entraîne un générateur qui produit de l'électricité [2]. Plus les générateurs tournent vite, plus ils fournissent d'électricité. La vitesse de la turbine, et par conséquent la quantité d'électricité produite par le générateur qu'elle actionne, dépendent de la pression de l'eau. Plus cette pression n'est grande et plus la turbine tourne vite.

Une centrale hydraulique est alimentée par une retenue d'eau. Un barrage est établi à travers une vallée pour accumuler un grand volume d'eau [2].

I.2.2.2- Le Fonctionnement D'une Centrale Hydraulique :

Le barrage (Figs. 1.2 et 1.3) retient l'eau, créant ainsi une retenue. Ensuite, on canalise l'eau qui va s'écouler vers un mécanisme de production d'énergie. Le débit est contrôlé par des vannes. A la sortie de la conduite, l'eau est projetée sur une turbine.

Cette turbine est couplée à un alternateur, qui va alors transformer l'énergie mécanique de l'eau en énergie électrique.

Puis, un transformateur élève la tension produite par l'alternateur afin qu'elle puisse être facilement transportée dans les lignes à haute et très haute tension du réseau de distribution électrique.

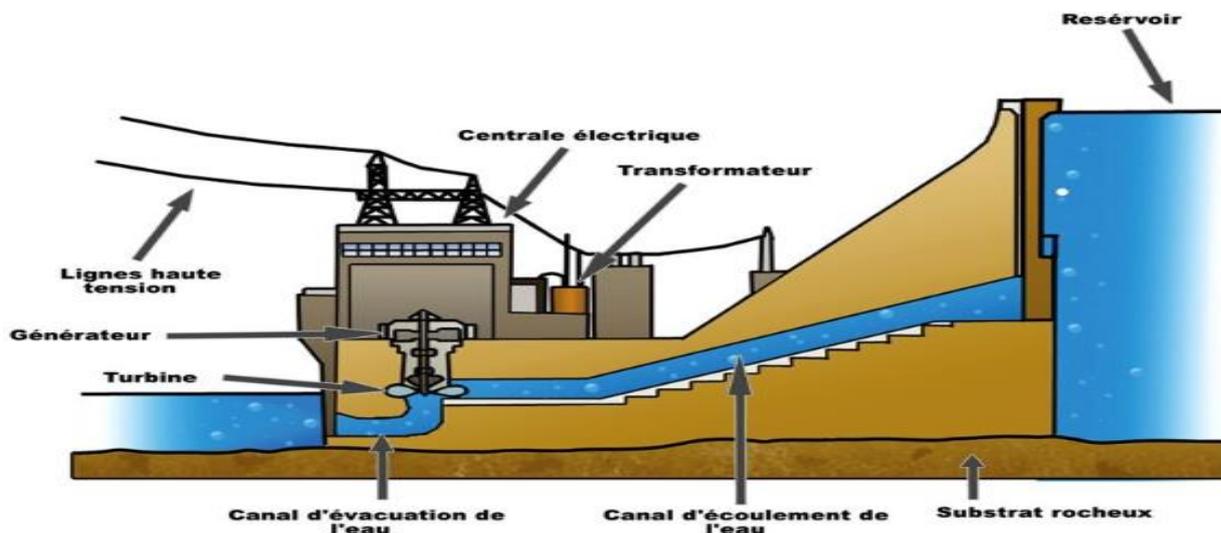


Fig. 1.2 Schéma d'une centrale hydraulique [2].

A la sortie de la turbine, l'eau est rejetée dans la rivière. La puissance de l'eau qui fait tourner la turbine, dépend donc du débit et de la hauteur de la chute [2].



Fig. 1.3 Quelques organes d'une centrale hydraulique [2].

Les centrales hydroélectriques produisent de l'électricité de manière très efficace. En fait, elles convertissent environ 90 % de l'énergie de l'eau en électricité.

Le rendement des centrales hydroélectriques est plus important que tout autre type de production d'énergie électrique. A titre d'exemple, le rendement d'une centrale nucléaire est inférieur à 40%. Les centrales hydroélectriques produisent 20% de l'électricité mondiale et plus de 40% dans les pays les plus développés [2].

I.2.2.3- Avantages :

- "facile" à construire et à utiliser
- utilise une énergie renouvelable

I.2.2.4- Inconvénients :

- un peu dépendant des conditions météorologiques (problème lors des sécheresses).
- nécessite l'inondation de vallée (villages évacués) en amont.
- en cas de défaillance du barrage, les conséquences peuvent être graves en aval [2].

I.2.3- Centrale éolienne :**I.2.3.1- Historique :**

Pendant l'antiquité les moulins à vent transformaient l'énergie éolienne en énergie mécanique. Mais aussi les moulins à eau se chargeaient de cette tâche. La première éolienne dit « industrielle » (qui pouvait produire de l'électricité) fut créée en en 1890 par Charles BUSH. Cette technologie ne rencontra pas un grand succès, surement à cause du choc pétrolier des années 1970 [3].

I.2.3.2- Fonctionnement :

Une éolienne est constituée des éléments suivants (Fig. 1.4) :

- **Un mât**, d'une hauteur comprise entre 60 et 100 mètres, à l'intérieur de laquelle se trouvent l'échelle d'accès et les câbles électriques de raccordement au réseau.
- **Une nacelle**, montée au sommet du mât, abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques, nécessaires au fonctionnement de la machine.
- **Un rotor**, guidant une hélice à 3 pales en matériaux composites d'une longueur de 30 à 45 mètres [3].

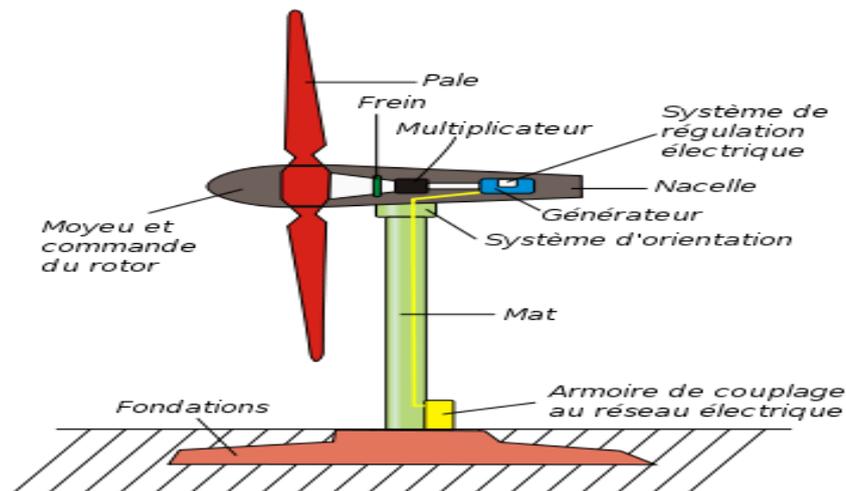


Fig. 1.4 les différents éléments d'une éolienne [3] .

I.2.3.4- Implantation d'une éolienne nécessite:

- Une étude d'implantation est nécessaire afin de localiser les zones suffisamment venteuses pour obtenir un rendement maximum.
- Le sol doit être suffisamment résistant pour supporter les fondations de l'éolienne.
- Dans une installation éolienne, il est préférable de placer la génératrice sur un mât à une hauteur de plus de 10 m jusqu'à environ 100 m, de façon à capter des vents plus forts. Dans les zones où le relief est très complexe, il est possible de doubler la quantité d'énergie produite en déplaçant l'installation de seulement quelques dizaines de mètres [3].

I.2.3.5- Avantages:

- Énergie Propre, pas de gaz à effet de serre.
- C'est l'énergie la moins chère de toutes les énergies renouvelables.
- Les coûts d'installation ne sont pas très élevés [3].

I.2.3.6- Inconvénients:

- Elles tournent uniquement s'il y a du vent, donc elles sont dépendantes de la météo et aussi de la nature du sol.
- Impact sur le paysage.
- Elles produisent beaucoup de bruit (55 Décibels).
- Dangereux pour les oiseaux, la vitesse des pales peuvent les surprendre [3].

I.2.4- Les centrales solaires :

Rappelons que la plupart des grandes centrales électriques (nucléaire, à charbon etc.) fonctionne selon le même principe : l'énergie thermique produite par une combustion (pétrole, charbon...) ou par fission nucléaire permet de transformer l'eau en vapeur ou de faire monter des gaz à très haute température et donc, selon la loi des gaz parfaits, à très haute pression. La différence de pression permet alors d'actionner des turbines ou des pistons, ceux-là font ensuite tourner un générateur électrique qui crée donc du courant. Le rendement final est d'autant plus élevé que la chaleur fournie au départ est à haute température. Un projet ambitieux qu'ont eu les européens est de créer une usine sur ce principe sans utiliser de carburant. Après tout, c'est grâce au soleil qu'il fait une température vivable sur terre. Alors pourquoi ne pas se servir directement de cette chaleur pour faire évaporer de l'eau et actionner des turbines, au lieu de brûler du fioul cher et de plus en plus rare ? Il a fallu attendre les

années 70 et 80 avant la création des premières centrales solaires électriques expérimentales. Le principe est de concentrer les rayons solaires vers un unique point afin de créer de hautes températures et ainsi produire de l'électricité grâce à un système tel que décrit ci-dessus. Les trois principaux types de centrales solaires thermiques se distinguent surtout par la manière dont on focalise les rayons solaires.

- Les collecteurs cylindro-paraboliques, qui sont de longs miroirs cylindriques qui concentrent les rayons sur un tuyau dans lequel un liquide est chauffé.
- Les centrales à tour, sortes de lampadaires entourés d'un champ de miroir orientables situés sur le sol (les héliostats) qui renvoient les rayons solaires vers le haut de la tour où est installé une chaudière.
- Les collecteurs paraboliques qui ressemblent à nos antennes de TV, dirigés en permanence vers le soleil et concentrent les rayons vers le point focal de cette parabole.

Il existe également plusieurs centrales photovoltaïques, composées d'un champ de panneaux solaires photovoltaïques dont le but est également de produire de l'électricité [4].

I.2.4.1- Les Avantages :

Se résumant, en ce qui suit :

- L'énergie solaire est inépuisable et non polluante.
- L'énergie est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre.
- L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage. L'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes.
- Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Le rendement énergétique est positif : il faut en moyenne entre 3 et 4 ans pour que le panneau produise l'énergie nécessaire à sa fabrication et un panneau solaire produit en moyenne entre 9 à 14 fois l'énergie qu'il a consommé pour sa fabrication [4].

I.2.4.2- Les Inconvénients :

On peut citer :

- Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé

- L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.
- La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil.
- Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes.
- Un cycle de vie en question : la durée de vie d'une installation solaire n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans.
- Les rendements des panneaux solaires sont encore faibles et de l'ordre de 20 % (pour les meilleurs) [4].

I.2.5- les Centrales Thermiques :

I.2.5.1- Définition :

La centrale thermique est une centrale électrique qui produit de l'électricité à partir d'une source de chaleur (charbon, gaz, fioul, biomasse ou déchets municipaux). La source de chaleur chauffe un fluide (souvent de l'eau) qui passe de l'état liquide à l'état gazeux (vapeur). Cette vapeur entraîne une turbine couplée à un alternateur qui transforme l'énergie cinétique contenue dans la vapeur en énergie mécanique de rotation, puis en énergie électrique grâce à une génératrice de courant [5].

I.2.5.2. Principe de fonctionnement d'une centrale thermique :

Une centrale thermique (Fig. 1.5) fonctionne grâce à la combustion du gaz naturel, du charbon pulvérisé) ou du fuel dans une chaudière à vapeur. La chaleur des gaz de fumées et des flammes sert à chauffer la tuyauterie de la chaudière et transforme progressivement l'eau qui y circule en vapeur.

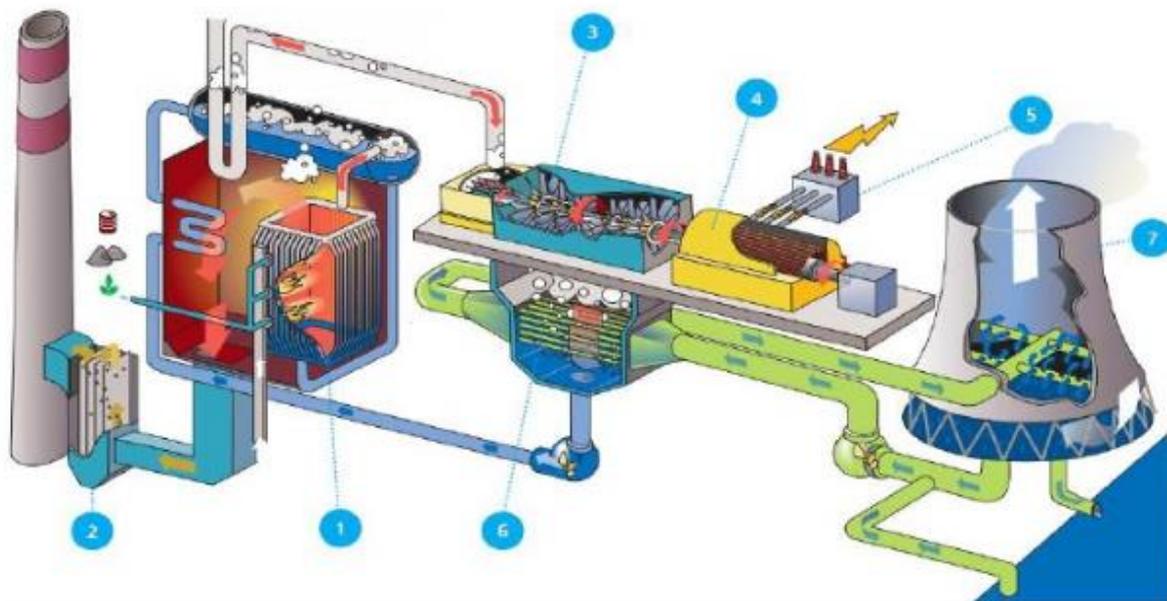
Les gaz de fumées s'échappent par la cheminée. Dans les centrales à charbon, un électrofiltre en retient d'abord les particules de poussière.

La vapeur fait tourner la turbine à vapeur, qui à son tour entraîne l'alternateur pour produire l'électricité. Le transformateur élève la tension du courant produit, avant qu'il ne soit injecté dans le réseau de transport.

Après son passage dans la turbine où elle libère son énergie, la vapeur se condense et retourne sous forme d'eau vers la chaudière. Dans le condenseur, la vapeur glisse sur des

milliers de tubulures remplies d'eau froide pompée des eaux de surface (eau de refroidissement) et lui cède sa chaleur.

La plupart des centrales refroidissent cette eau devenue relativement chaude, dans une tour de refroidissement, pour ensuite la réutiliser. Dans ces immenses tours de refroidissement, en forme d'hyperbole, l'eau entre en contact avec un courant d'air ascendant créé par le tirage naturel (effet de cheminée de la tour de refroidissement). Lorsque des ventilateurs créent ce flux d'air, la tour de refroidissement est plus petite, l'eau se refroidit être tombe sous forme de gouttelettes dans la tour de refroidissement ; L'air réchauffé saturé de vapeur d'eau, s'échappe de la tour de refroidissement en un nuage de vapeur blanc. Une grande partie de l'eau de refroidissement refroidie est pompée vers le condenseur et réutilisée et seul (1-1,5) % s'évapore. Une centrale thermique transforme 35 à 40 % de l'énergie du combustible en électricité. Elle fournit parfois aussi de la chaleur, sous forme de vapeur d'eau [5].



- 1: Chaudière à vapeur
- 2: Electro filtre
- 3: Turbine à vapeur
- 4: Alternateur
- 5 : Transformateur
- 6 : Condenseur
- 7 : Tour de refroidissement

Fig.1.5 Schéma d'une centrale thermique[5].

I.2.5.3- Description des principes organes d'une centrale thermique**I.2.5.3.1- Turbine à vapeur :****I.2.5.3.1.a- Définition :**

La turbine à vapeur est un moteur thermique rotatif qui convertit l'énergie d'un courant de vapeur d'eau ou en énergie mécanique. Plus généralement c'est un organe qui permet la détente d'un fluide en transformant son énergie sous forme mécanique [6].

I.2.5.3.1.b- Historique :

La turbine à vapeur est le fruit du travail de nombreux chercheurs et ingénieurs, à la fin du XIXe siècle. Parmi les contributions notoires au développement de ce type de turbine, on peut mentionner celle du Britannique *Charles Algernon Parsons* et celles du Suédois *Carl Gustav Parsons* fut à l'origine du principe de la séparation des étages, selon lequel la vapeur se dilate dans un certain nombre d'étages, produisant à chaque fois de l'énergie.

De Laval fut le premier à concevoir des jets et des augets adaptés à une utilisation efficace de la vapeur en expansion [7].

I.2.5.3.1.c- Différents catégories des turbines :

Les turbines sont classées selon leur mode de fonctionnement ainsi qu'à leurs modestes constructions. On distingue trois grandes catégories de turbines :

- turbines hydrauliques ou à eau.
- turbines à gaz.
- turbines à vapeur. Dans cette étude, on se limite à l'étude des turbines à vapeur.

I.2.5.3.1.d- Description de la turbine à vapeur :

La turbine à vapeur (Fig. 1.6) comprend une partie fixe appelée stator qui porte des aubes directrices. La vapeur en provenance de l'évaporateur est admise dans un collecteur. Elle s'écoule ensuite dans des canaux fixes (c'est là où l'énergie thermique se transforme en énergie cinétique) et dans des canaux mobiles (les énergies thermiques et cinétiques sont transformées en énergie mécanique). Les canaux fixes et mobiles se succèdent les uns à la suite des autres dans le sens de l'écoulement. La vapeur en provenance du générateur de vapeur est introduite dans les premiers étages de la turbine à travers des vannes d'admission et des soupapes de réglage asservies aux dispositifs de sécurité et de réglage de la turbine. La vapeur est détendue adiabatiquement en produisant un travail mécanique. La détente de la vapeur à travers les divers étages de la turbine se fait de façon différente selon qu'il s'agisse de turbines à action ou à réaction [8]. .

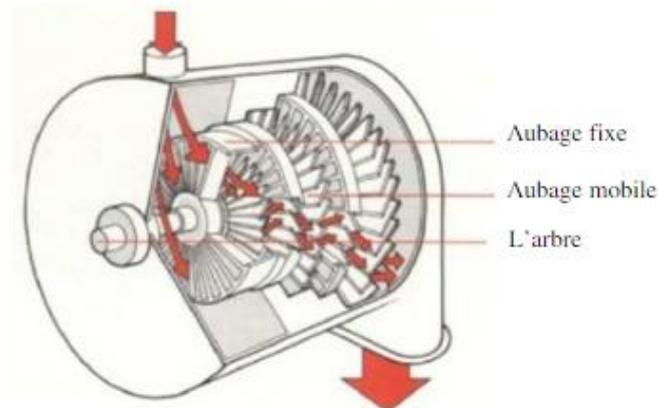


Fig.1.6 Schéma de turbine à vapeur (Parsons) [8].

I.2.5.3.1.e- Principe de fonctionnement :

Bien que les turbines à vapeur (Fig. 1.7) soient construites selon deux configurations différentes (à action ou à réaction), leurs éléments essentiels sont similaires. Elles se composent de tuyères ou de jets, et d'ailettes (aubes). La vapeur s'écoule dans les tuyères, dans lesquelles elle se dilate, ainsi, sa température diminue et son énergie cinétique augmente. La vapeur en mouvement exerce une pression contre les aubes, entraînant leur rotation. La disposition des jets et des aubes, fixes dépend du type de turbine. À la sortie du dernier condenseur, l'eau peut être de nouveau vaporisée et surchauffée, l'eau ou la vapeur récupérée en sortie est ramenée vers la chaudière par des pompes. La turbine à vapeur utilise les principes de la thermodynamique, lorsque la vapeur se dilate, sa température et donc son énergie interne diminuent. Cette diminution de l'énergie internes accompagne d'une augmentation de l'énergie cinétique sous forme d'une accélération des particules de vapeur (une réduction de 100 kJ de l'énergie interne, due à la dilatation, peut provoquer un accroissement de la vitesse des particules de vapeur de l'ordre de 2 800 km/h), à de telles vitesses, l'énergie disponible est très importante. Lorsque la pression de la vapeur d'eau en sortie de la turbine est égale à la pression atmosphérique, la turbine est dite à condensation. Aujourd'hui, les turbines à vapeur sont généralement limitées à une température maximale de 580 °C dans le premier étage, et à une pression maximale d'admission de 170 à 180 bars [7].

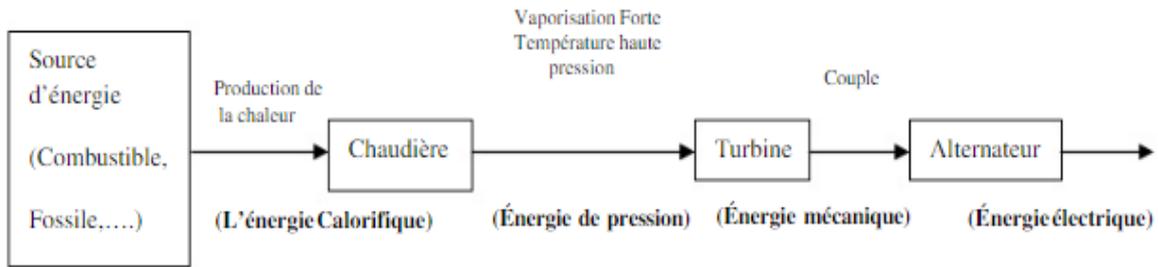


Fig.1.7 Principe de fonctionnement d’une turbine à vapeur [7].

I.2.5.3.2- Chaudière :

I.2.5.3.2 .a- Introduction :

La chaudière (Fig. 1.8) est un générateur de chaleur produisant généralement de l'eau chaude pour le chauffage. Ce n'est pas la seule utilisation d'une chaudière qui peut produire de la vapeur, le plus souvent pour des applications industrielles. Une chaudière comporte un corps de chauffe avec un circuit d'eau intégré qui récupère la chaleur produite par un brûleur utilisant un combustible gaz, fioul, bois ... Elle présente de par son combustible, un rendement de combustion. Selon son dimensionnement et les différents appels de puissance, elle génèrera un rendement de production.

Dire d'une chaudière qu'elle est une chaudière à gaz, ou une chaudière au fioul ou une chaudière à bois pourra présenter différents rendements selon les applications qu'elle sert. D'où la notion d'économies d'énergie et d'efficacité énergétique de la dite chaudière.

L'efficacité des chaudières est désormais réelle. Nous trouvons les meilleurs rendements avec les chaudières à condensation. La chaleur latente des fumées est ainsi récupérée sur le retour d'eau chaude de chauffage. Les fumées sortent plus froides et la chaleur est transférée au circuit de chauffage [9].



Fig. 1.8 Chaudière industrielle [9].

I.2.5.3.2 .b- Principe de fonctionnement d'une chaudière:

Quel que soit le modèle que vous avez, le principe de fonctionnement d'une chaudière repose sur des éléments qui varient peu :

- Une chaudière a besoin d'un carburant, d'une source d'énergie : bois, fioul, gaz, électricité, ou plus récemment, air.
- Pour les chaudières à combustion, le carburant est brûlé, et c'est cette action qui produit de la chaleur.
- Pour les modèles électriques ou thermodynamiques, il n'y pas de combustion, mais l'utilisation d'une source d'énergie "invisible".
- Dans tous les cas, l'énergie utilisée ou dégagée par la combustion sert à produire de la chaleur, qui se transmet ensuite à des circuits reliés à des émetteurs de chaleur (radiateurs, planchers chauffants) et/ou au dispositif d'alimentation en eau chaude.
- Les vapeurs dégagées et résidus de combustion sont évacués, sauf dans les modèles à condensation, dans lesquels la vapeur est réutilisée en circuit interne [9].

I.2.5.3.3- Condenseur :

I.2.5.3.3.a- Introduction :

Il est de coutume de designer par condenseur un appareil dont la fonction est de condenser de la vapeur, le réchauffage obligatoire du fluide froid auxiliaire n'étant qu'une conséquence

(parfois nuisible). Par opposition aux échangeurs de chaleur (réchauffeurs) où la condensation de vapeur n'est qu'un moyen d'obtenir le but désiré : le réchauffage d'un certain fluide [10].

I.2.5.3.3 .b- Classification des condenseurs :

Nous pouvons classer les condenseurs en deux grandes familles :

- Les condenseurs par surface, sans contact entre la vapeur à condenser et le fluide réfrigérant, une surface d'échange s'interposant entre eux.
- Le condenseur par mélange avec, comme leur nom l'indique, mélange totale entre la vapeur à condenser et le fluide réfrigérant.

Ces derniers restent très peu utilisés du fait de l'impossibilité de mélange entre la vapeur et l'eau de refroidissement, en générale de l'eau brute [10].

I.2.5.3.3 .c- Principe de fonctionnement :

Les condenseurs sont souvent des échangeurs de chaleur à calandre et faisceau tubulaire.

La condensation se fait presque systématiquement dans la calandre. On utilise généralement des tubes d'un centimètre de diamètre et de longueur comprise entre 2 et 6 mètres, avec un pas triangulaire ou un pas carré. Un des critères pour ces choix est souvent la perte de charge, surtout pour des appareils travaillant à pression réduite.

Dans le cas d'une pompe à chaleur, le fluide frigorigène, après avoir emmagasiné de la chaleur et s'être évaporé dans l'évaporateur, circule dans un circuit fermé. Ensuite, il passe à proximité d'une source plus fraîche (air, sol ou eau) et ainsi se condense pour refaire un cycle.

Cet échangeur de chaleur permet la condensation du fluide frigorigène. Ce phénomène exothermique permet de restituer de la chaleur au médium (eau, air...), donc de le réchauffer. C'est par exemple le cas dans une chaudière à condensation [11].

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a essayé de décrire les différentes centrales productrices d'énergie. En effet, nous nous sommes intéressés aux principes de fonctionnement et à la description des différents organes rencontrés au niveau de ces centrales.

II.1-Introduction

Ce chapitre est consacré à l'exposition des approches énergétique et exergétique respectivement. La première approche est essentiellement basée sur le premier principe de la thermodynamique, tandis que la seconde est fondée sur la combinaison des deux premiers principes de la thermodynamique.

II.2. Approche énergétique

II.2.1- Notion d'énergie

L'énergie se manifeste sous plusieurs formes, chacune avec ses caractéristiques. Ces dernières sont liées à leur capacité à provoquer des changements. Les différentes formes d'énergie peuvent être classées en deux catégories [13] :

- les énergies ordonnées.
- les énergies désordonnés.

II.2.1.1- Energie ordonnée

Les énergies ordonnées regroupent l'énergie potentielle et l'énergie cinétique qui possèdent les caractéristiques suivantes [13] :

- Possibilité de passer d'un type à l'autre avec conservation totale en opérant de façon réversible.
- Le Transfer d'énergie ordonnée entre deux systèmes s'effectue uniquement par échange d'énergie-travail
- Le Transfer d'énergie ordonnée entre deux systèmes n'entraîne pas de variation d'entropie
Ainsi de tels procédés peuvent être analysés à l'aide du premier principe de la thermodynamique seulement.
- Les paramètres de l'environnement ne sont pas considérés lors du Transfer d'énergie ordonnée entre deux systèmes.

II.2.1.2- Energie désordonnée

Cette forme d'énergie regroupe tous les autres types d'énergies [13] :
Différente des énergies ordonnées notamment l'énergie thermique, l'énergie chimique... etc.
Elle possède les caractéristiques suivantes.

- Pour avoir un maximum de conversion d'une forme d'énergie désordonnée en une forme ordonnée, il est nécessaire d'avoir un procédé entièrement réversible.
- La limite maximale d'une telle conversion dépend des paramètres thermodynamiques des procédés mais aussi de l'environnement. La conversion engendre une variation d'entropie

- L'analyse des formes d'énergies désordonnées nécessite l'utilisation du deuxième principe de la thermodynamique.

II.2.2- Bilan énergétique

Considérons un système quelconque, donnant lieu à des transferts-travail, des transferts-chaueur et des transferts de masse. Un tel système peut être représenté schématiquement par la figure 2.1 [13] :

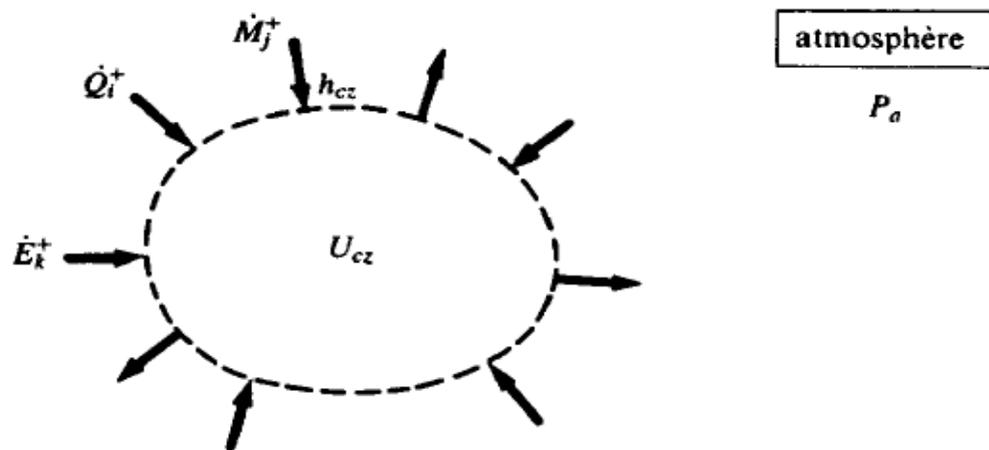


Fig. 2.1 Système thermodynamique quelconque [13].

En vertu du Premier Principe de la thermodynamique, le bilan énergétique en puissance, relatif à un système quelconque, est exprimé par l'équation (2.1):

$$\frac{dU_{CZ}}{dt} = \sum_k [\dot{E}_k^+] + \sum_i [\dot{Q}_i^+] + \dot{Q}_a \sum_j [\dot{h}_{czj}^+ M_i^+] \tag{2.1}$$

Dans laquelle, nous définissons:

- * U_{CZ} : énergie interne totale.
- * $\dot{E}_k^+ = \delta E_k^+ / dt$: puissance-travail reçue par le système, d'un système k, autre que l'atmosphère
- * $\dot{Q}_i^+ = \delta Q_i^+ / dt$: puissance-chaueur reçue par le système, d'un système i, autre

que l'atmosphère

- * $\dot{Q}_a^+ = \delta Q_a^+ / dt$: puissance-chalear reçue par le système, de l'atmosphère.
- * $\dot{M}_j^+ = dM_j^+ / dt$: débit-masse reçu par le système, en une section j , d'un système externe j .
- * h_{czj} : enthalpie totale massique du fluide au droit de la section j

Remarquons que le système baigne dans l'atmosphère a pression P_a . Lorsque son volume V augmente de dV , une puissance-travail $P_a dV/dt$ est donnée par le système à l'atmosphère. le terme $\sum_k [\dot{E}_{ek}^+]$ représente la puissance-travail effective fournie au système, en dehors du transfert-travail avec l'atmosphère [13]:

$$\sum_k [\dot{E}_{ek}^+] = \sum_k [\dot{E}_k^+] + P_a \frac{dv}{dt} \tag{2.2}$$

(2.2) peut s'écrire également :

$$\sum_k [\dot{E}_k^+] = \sum_k [\dot{E}_{ek}^+] - P_a \frac{dv}{dt} \tag{2.3}$$

Rappelons qu'en faisant passer le terme de puissance-travail (2.3) avec l'atmosphère dans le terme de stockage (Eq. (2.1)), nous obtenons le bilan énergétique :

$$\sum_k [\dot{E}_{ek}^+] + \sum_i [\dot{Q}_i^+] + \dot{Q}_a^+ + \sum_j [h_{czj}^+ \dot{M}_j^+] - \frac{d(U_{cz} + P_a V)}{dt} = 0 \tag{2.4}$$

L'énergie effective se définit comme suit :

$$U_e = U + P_a V \tag{2.5}$$

L'énergie effective totale sera alors :

$$U_{ecz} = U_{cz} + P_a V \tag{2.6}$$

Tenant compte de (2.5) , l'équation du bilan énergétique (2.4) prend de forme :

$$\sum_k [\dot{E}_{ek}^+] + \sum_i [\dot{Q}_i^+] + \dot{Q}_a^+ + \sum_j [h_{czj}^+ \dot{M}_j^+] - \frac{dU_{ecz}}{dt} = 0 \tag{2.7}$$

Par la suite, on peut définir une nouvelle grandeur appelée puissance – transformation, donnée par l'expression suivante :

$$\dot{Y}^+ = \sum_j [h_{czj}^+ \dot{M}_j^+] - \frac{d(U_{ecz} + P_a V)}{dt} \quad (2.8)$$

La relation (2.8) représente la différence entre la somme des transferts d'enthalpie totale $[h_{czj}^+ \dot{M}_j^+]$ à travers la frontière avec l'altération $\frac{dU_{ecz}}{dt}$ de l'énergie interne (énergie stockée) du système [13].

II.2.2.1- Notion de réseaux :

Nous appelons réseau toute partie du système comportant des espaces contigus, susceptibles de contenir ou d'être traversés par des fluides. Cette définition implique que deux réseaux différents sont séparés par une surface située à la limite ou à l'intérieur de parois solides. Ces parois peuvent être mobiles et conductrices, de sorte qu'il peut y avoir des transferts-travail et des transferts-chaleur d'un réseau à l'autre, la seule restriction étant qu'il ne peut pas y avoir de transfert de masse. La Fig. 2.2 montre l'exemple d'un système comportant deux réseaux α et β [13].

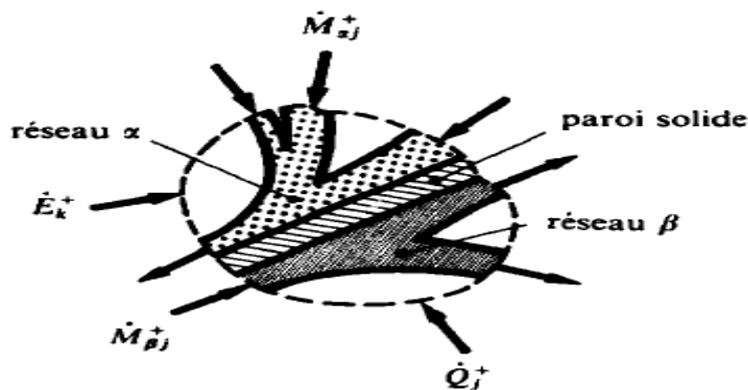


Fig. 2.2 Système thermodynamique comportant deux réseaux [13].

Il est possible de définir la puissance-transformation \dot{Y}_n^+ reçue au niveau de chaque réseau n. Le bilan énergétique en puissance (2.4) peut alors être mis sous la forme:

$$\sum_k [\dot{E}_k^+] + \sum_i [\dot{Q}_i^+] + \dot{Q}_a^+ + \sum_n [\dot{Y}_n^+] = 0 \quad (2.9)$$

Sous forme différentielle, le bilan énergétique relatif à un temps dt est:

$$\sum_k [\delta E_k^+] + \sum_i [\delta Q_i^+] + \delta Q_a^+ + \sum_n [\delta Y_n^+] = 0 \quad (2.10)$$

Enfin, sous forme finie, le bilan énergétique relatif à un temps Δt s'exprime par la relation:

$$\sum_k [E_k^+] + \sum_i [Q_i^+] + Q_a^+ + \sum_n [Y_n^+] = 0 \quad (2.11)$$

dans laquelle Y_n^+ est l'énergie-transformation reçue au niveau du réseau n:

$$Y_n^+ = \left\{ \sum_j [\int h_{czj}^+ dM_j^+] - \Delta (U_{cz} + P_a V) \right\}_n \quad (2.12)$$

L'introduction du concept d'Energie-transformation est d'un grand intérêt, car il permet d'englober dans une théorie unique les systèmes fermés, les systèmes ouverts en régime permanent et les systèmes ouverts en régime non permanent [13].

II.2.2.2- Efficacité

D'une façon générale, nous appelons efficacité le rapport entre les prestations énergétiques données par le système et les prestations énergétiques reçues par le système. Malheureusement, il n'est pas possible de donner une définition générale de ce rapport, car les valeurs des diverses prestations varient de cas en cas [13].

Toutefois, il est généralement admis que l'énergie-chaleur Q_a transférée entre le système et l'atmosphère ne peut être considérée ni comme une prestation reçue, ni comme une prestation donnée, car elle n'a pas de valeur intrinsèque. C'est pourquoi le terme Q_a ne figurera pas dans les diverses expressions de l'efficacité. Cela revient à dire que l'Energie chaleur Q_a n'a pas de valeur quand on la donne et qu'elle est gratuite quand on la reçoit [13].

Dans le cas des installations motrices, des installations de chauffage et des installations de cogénération, le bilan (2.4) peut, en omettant les indices pour simplifier, être mis sous la forme:

$$\sum[\dot{E}^-] + \sum[\dot{Q}^-] + \dot{Q}_a^- + \sum[\dot{Y}^-] = \sum[\dot{E}^+] + \sum[\dot{Q}^+] + \dot{Q}_a^+ + \sum[\dot{Y}^+] \quad (2.13)$$

Ou toutes les puissances données par le système figurent au premier membre et toutes les puissances reçues par le système au second membre.

Précisons que les expressions $\sum[\dot{Q}^-]$ et $\sum[\dot{Q}^+]$ concernent toutes les puissances-chaleur transférées entre le système et les différentes sources, à l'exclusion des puissances-chaleur \dot{Q}_a^- et \dot{Q}_a^+ qui sont transférées entre le système et l'atmosphère.

En admettant arbitrairement que les puissances-chaleur \dot{Q}_a^- et \dot{Q}_a^+ sont considérées soit comme sans valeur, soit comme gratuites, le bilan énergétique (2.13) suggère la définition de l'efficacité [13].

II.2.2.3- Efficacité d'un système :

Elle est définie par :

$$\varepsilon = \frac{\sum[\dot{E}^-] + \sum[\dot{Q}^-] + \dot{Q}_a^- + \sum[\dot{Y}^-]}{\sum[\dot{E}^+] + \sum[\dot{Q}^+] + \dot{Q}_a^+ + \sum[\dot{Y}^+]} \quad (2.14)$$

Examinons maintenant si l'expression (2.14) conduit à une définition satisfaisante de l'efficacité dans le cas d'une installation motrice par exemple [13].

II.2.2.4- Installation motrice

Par exemple, pour une installation motrice à vapeur, en régime permanent, la relation (2.13) donne le bilan énergétique :

$$\dot{E}^- = \dot{Q}_h^+ - \dot{Q}_a^- \quad (2.15)$$

et la définition (2.14) donne l'efficacité motrice :

$$\varepsilon_m = \frac{\dot{E}^-}{\dot{Q}_h^+} = 1 - \frac{\dot{Q}_a^-}{\dot{Q}_h^+} < 1 \quad (2.16)$$

dans laquelle nous avons:

$\dot{E}^- = \dot{E}_T - \dot{E}_P$: puissance-travail donnée par le système, en admettant que la puissance-travail \dot{E}_P requise par la pompe est prélevée sur la puissance-travail \dot{E}_T fournie par la turbine.

\dot{Q}_h^+ : puissance – chaleur reçue par le chaudidre.

Comme le rapport $\dot{Q}_a^- / \dot{Q}_h^+$ n'est pas du tout faible, nous constatons que l'efficacité motrice d'une installation motrice est en général très inférieure à 100% [13].

II.3-Approche exergetique :

2.3.1-Bilan exergetique.

Considérons à nouveau un système quelconque. Un tel système peut être représenté schématiquement par la Fig. 2.3 [13].

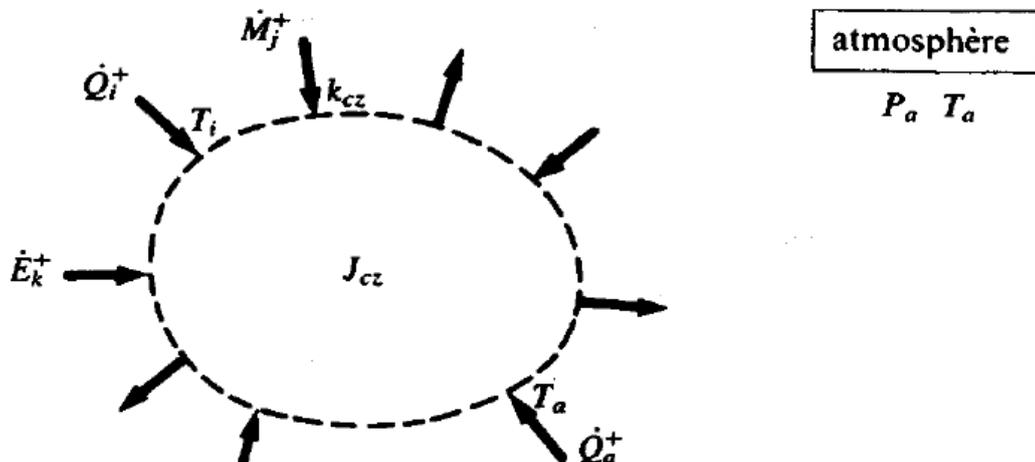


Fig. 2.3 Système thermodynamique quelconque [13].

En vertu des relations (2.4) et (2.8), le premier principe est exprimé par le bilan énergétique [13]:

$$\sum_k [\dot{E}_k^+] + \sum_i [\int \delta \dot{Q}_i^+] + \dot{Q}_a^+ + \sum_n [\dot{Y}_n^+] = 0 \quad (2.18)$$

Avec :

- * \dot{E}_k^+ : puissance – travail reçue par le système au niveau de la machine k .
- * \dot{Q}_i^+ : puissance-chaleur reçue de la source à température T_i (dans le cas général ou T_i est variable, il convient d'intégrer par rapport à l'espace).
- * \dot{Q}_a^+ : puissance-chaleur reçue de l'atmosphère, à la température T_a

$$\dot{Y}_n^+ = \left\{ \sum_j [h_{czj}^+ \dot{M}_j^+] - \frac{d U_{ecz}}{dt} \right\}_n \quad \text{puissance}$$

– transformation effective reçue au niveau du réseau n . (2.19)

Précisons bien que la température T_i est la température commune à la source i et au système, le long de la frontière en traits pointillés. Il en est de même de la température T_a .

Le deuxième principe est exprimé par le bilan d'entropie :

$$\frac{ds}{dt} = \sum_i \left[\int \frac{\delta \dot{Q}_i^+}{T_i} \right] + \frac{\dot{Q}_a^+}{T_a} + \sum_j [s_j \dot{M}_j^+] + \dot{S}^i \quad (2.20)$$

*S : entropie du système.

* S_j : entropie massique du fluide au droit de la section j .

* \dot{S}^i : entropie due aux opérations internes irréversibles, c'est-à-dire simplement aux

Irréversibilités du système. Elle caractérise la création d'entropie.

Comme nous l'avons fait pour le bilan énergétique (2.18), nous avons traité séparément la source à température T_a , constituée par l'atmosphère avec l'expression:

$$\sum_i \left[\int \frac{\delta \dot{Q}_i^+}{T_i} \right] + \frac{\dot{Q}_a^+}{T_a} \quad (2.21)$$

L'équation (2.21) peut se remplacer par : $\sum_i \left[\int \frac{\delta \dot{Q}_i^+}{T_i} \right]$.

En vertu du deuxième principe, nous avons toujours :

$$\delta \dot{S}^i \geq 0 \quad \frac{\delta \dot{S}^i}{dt} + \dot{S}^i = 0 \quad (2.22)$$

Etant donné la propriété d'extensivité de l'entropie, nous pouvons effectuer des sommations sur les réseaux n et remplacer :

$$\frac{dS}{dt} \quad \text{par} \quad \sum_n \left[\frac{dS}{dt} \right]_n \quad (2.23)$$

$$\sum_j [s_j \dot{M}_j^+] \text{ par } \sum_n \left\{ \sum_j [s_j \dot{M}_j^+] \right\} \quad (2.24)$$

En tenant compte des substitutions indiquées ci-dessus, il est possible de mettre le bilan entropique (2.20) sous la forme:

$$\sum_i \left[\int \frac{\delta \dot{Q}_i^+}{T_i} \right] + \frac{\dot{Q}_a^+}{T_a} + \sum_n \left\{ \sum_j [s_j \dot{M}_j^+] - \frac{dS}{dt} \right\} + \dot{S}^i = 0 \quad (2.25)$$

En multipliant tous les termes de ce bilan par la température T_a de l'atmosphère, nous obtenons l'équation suivante:

$$\sum_i \left[\int \frac{T_a}{T_i} \delta \dot{Q}_i^+ \right] + \dot{Q}_a^+ + \sum_n \left\{ \sum_j [T_a s_j \dot{M}_j^+] - \frac{d}{dt} (T_a S) \right\} + T_a \dot{S}^i = 0 \quad (2.26)$$

Le bilan exergetique est obtenu en éliminant Q_a entre les équations (2.4) (Ier Principe) et (2.26) (II^e Principe). On obtient le bilan exergetique [13]:

$$\begin{aligned} \sum_k [\dot{E}_k^+] + \sum_i \left[\int \delta \dot{Q}_i^+ \right] + \dot{Q}_a^+ + \sum_n \left\{ \sum_j [h_{czj} \dot{M}_j^+] - \frac{d(U_{cz} + P_a V)}{dt} \right\} \\ - \sum_i \left[\int \frac{T_a}{T_i} \delta \dot{Q}_i^+ \right] + \dot{Q}_a^+ + \sum_n \left\{ \sum_j [T_a s_j \dot{M}_j^+] - \frac{d}{dt} (T_a S) \right\} = T_a \dot{S}^i \geq 0 \\ \sum_k [\dot{E}_k^+] + \sum_i \left[\int \left(1 - \frac{T_a}{T_i}\right) \delta \dot{Q}_i^+ \right] + \sum_n \left\{ \sum_j [(h_{czj} - T_a s_j) \dot{M}_j^+] - \frac{d}{dt} (U_{cz} + P_a V - T_a S) \right\} = T_a \dot{S}^i \geq 0 \end{aligned} \quad (2.27)$$

II.3.1.1- Terminologie et symbolisme

Le bilan exergetique (2.27) fait apparaitre un certain nombre de grandeurs nouvelles pour lesquelles nous proposons un nom et un symbole [13].

Nous définissons les grandeurs suivantes:

* **coénergie totale [J]** $J_{cz} = U_{cz} + P_a V - T_a S \quad (2.28)$

* **coénergie totale massique [J/kg]** $j_{cz} = u_{cz} + P_a v - T_a s \quad (2.29)$

$$* \text{ coenthalpie totale [J]} \quad K_{cz} = H_{cz} - T_a S \quad (2.30)$$

$$* \text{ coenthalpie totale massique [J/kg]} \quad k_{cz} = h_{cz} - T_a s \quad (2.31)$$

$$* \text{ facteur de Carnot} \quad \theta = 1 - \frac{T_a}{T} \quad (2.32)$$

$$* \text{ cotravail – chaleur reçue [J]} \quad E_q^+ = \int \theta \delta Q^+ \quad (2.33)$$

$$* \text{ copuissance – chaleur reçue [W]} \quad \dot{E}_q^+ = \int \theta \delta \dot{Q}^+ \quad (2.34)$$

$$* \text{ cotravail – transformation reçue [J]} \quad E_y^+ = \sum_j \left[\int k_{czj} dM_j^+ \right] - \Delta J_{cz} \quad (2.35)$$

$$* \text{ copuissance – transformation reçue [W]} \quad \dot{E}_y^+ = \sum_j \left[k_{czj} \dot{M}_j^+ \right] - \frac{dJ_{cz}}{dt} \quad (2.36)$$

$$* \text{ perte exergetique en énergie [J]} \quad L = T_a + S^i \geq 0 \quad (2.37)$$

$$* \text{ perte exergetique en puissance [W]} \quad \dot{L} = T_a + \dot{S}^i \geq 0 \quad (2.38)$$

II.3.1.2- Coenthalpie

II.3.1.2.a- Définition :

Nous considérons la coenthalpie comme une fonction d'état extrinsèque, définie par la relation, sous forme absolue:

$$K = H - T_a S \quad (2.39)$$

Ou sous forme massique:

$$k = h - T_a s \quad (2.40)$$

dans laquelle T_a est toujours la valeur moyenne, considères comme constante, de la température de l'atmosphère [13].

L'introduction de la fonction k est justifiée par le rôle important qu'elle joue dans les bilans exergetiques, comme le montre l'équation (2.36).

Remarquons que, en vertu de la définition ((2.40)), la valeur de la coenthalpie d'un système est déterminée dès que les valeurs de deux fonctions d'état quelconques (S et H), ainsi que celle de T_a , sont fixées [13].

II.3.1.3- Expression générale

Etant donné ces définitions, le bilan exergetique (2.27) en puissance peut être mis sous la forme:

$$\sum_k [\dot{E}_{ek}^+] + \sum_i [\dot{E}_{qi}^+] + \sum_n [\dot{E}_{yn}^+] = \dot{L} \geq 0 \tag{2.41}$$

Où nous avons (la valeur numérique de chacun des termes du membre de gauche pouvant être positive ou négative):

- * \dot{E}_{ek}^+ : puissance – travail effective, reçue par le système au niveau de la machine **k**
- * \dot{E}_{qi}^+ : copuissance-chaleur reçue de la source à température **T_i**
- * \dot{E}_{yn}^+ : copuissance-transformation reçue au niveau du réseau d'écoulement **n**
- * \dot{L} : perte exergetique globale

L'équation (2.41) constitue une forme très condensée et symétrique des deux principes réunis. C'est à notre avis l'expression la plus générale et la plus élégante de la théorie de l'exergie [13].

Sous forme différentielle, le bilan exergetique relatif à un temps dt s'exprime par la relation :

$$\sum_k [\delta E_{ek}^+] + \sum_i [\delta E_{qi}^+] + \sum_n [\delta E_{yn}^+] = \delta L \geq 0 \tag{2.42}$$

Enfin, sous forme finie, le bilan exergetique relatif à un temps Δt est:

$$\sum_k [E_{ek}^+] + \sum_i [E_{qi}^+] + \sum_n [E_{yn}^+] = L \geq 0 \tag{2.43}$$

II.3.1.4- Perte exergetique

II.3.1.4.a- Définition :

La perte exergetique L est la diminution de la possibilité d'obtention de travail, due aux irréversibilités internes du système.

Elle exprime quantitativement ce qui est exprimé qualitativement par la notion de dégradation de l'énergie.

Selon (2.37), la perte exergetique L est égale au produit de l'entropie S^i due aux irréversibilités internes par la température T_a de l'atmosphère. Nous avons sous forme différentielle la définition [13]:

$$\delta L \equiv T_a \delta S^i \geq 0 \quad (2.44)$$

La perte exergetique en énergie L est définie par la relation (2.37):

$$L \equiv T_a S^i \geq 0 \quad (2.45)$$

La perte exergetique en puissance \dot{L} est définie de la même manière par la relation (2.38):

$$\dot{L} \equiv T_a \dot{S}^i \geq 0 \quad (2.46)$$

II.3.1.4.b- Dissipation :

L'augmentation d'entropie due à une dissipation est donnée, par la relation [13]:

$$\delta S^i = \delta S^r = \frac{\delta R}{T} \quad (2.47)$$

dans laquelle nous avons:

- δR : dissipation due à un frottement visqueux.
- T : température à laquelle se produit le frottement.

La perte exergetique correspondante est donc, selon (2.47):

$$\delta L_r = \frac{T_a}{T} \delta R \quad (2.48)$$

Dans le cas où la température T est constante, nous obtenons, sous forme finie, la perte exergetique:

$$L_r = \frac{T_a}{T} R \quad (2.49)$$

Cette perte représente le travail maximal qui aurait été obtenu si la transformation thermodynamique du système avait été effectuée de façon réversible, compte tenu de l'exergie-chaleur qu'il faudrait fournir au système pour qu'il suive la même transformation thermodynamique. La relation (2.49) peut être contrôlée par le raisonnement suivant : la transformation réversible donnerait le travail supplémentaire [13]:

$$E^- = R \quad (2.50)$$

Le chauffage destiné à remplacer l'énergie de frottement exigerait, selon l'exergie-chaleur:

$$E_q^+ = \theta R = \left(1 - \frac{T_a}{T}\right) R \quad (2.51)$$

De sorte que le travail maximal serait:

$$E_{max}^- = E^- - E_q^+ = \frac{T_a}{T} R \quad (2.52)$$

Ce qui correspond bien à l'expression (2.49) de la perte exergetique L_r .

La Fig. 2.4 représente la variation du rapport T_a/T et de la perte exergetique L_r en fonction de la température T avec en paramètre la température T_a de l'atmosphère. Nous constatons que:

- pour $T = \infty$, nous avons $T_a/T = 0$ et la perte L_r est nulle
- pour $T_a < T < \infty$, nous avons $1 > T_a/T > 0$ et la perte est inférieure à la dissipation R , et cela d'autant moins que T est faible.
- pour $T = T_a$ nous avons $T_a/T = 1$ et la perte est égale intégralement à la dissipation.
- pour $0 < T < T_a$, nous avons $\infty > T_a/T > 1$ et la perte est supérieure à la dissipation.
- pour $T = 0$, nous avons $T_a/T = \infty$ et la perte est infinie.

Nous avons ainsi montré qu'une dissipation déterminée conduit à une perte exergetique d'autant plus faible qu'elle se produit à haute température. Cela se conçoit par le fait que l'exergie-chaaleur correspondant à la chaleur de frottement est d'autant plus grande que cette dernière est engendrée à un niveau élevé [13].

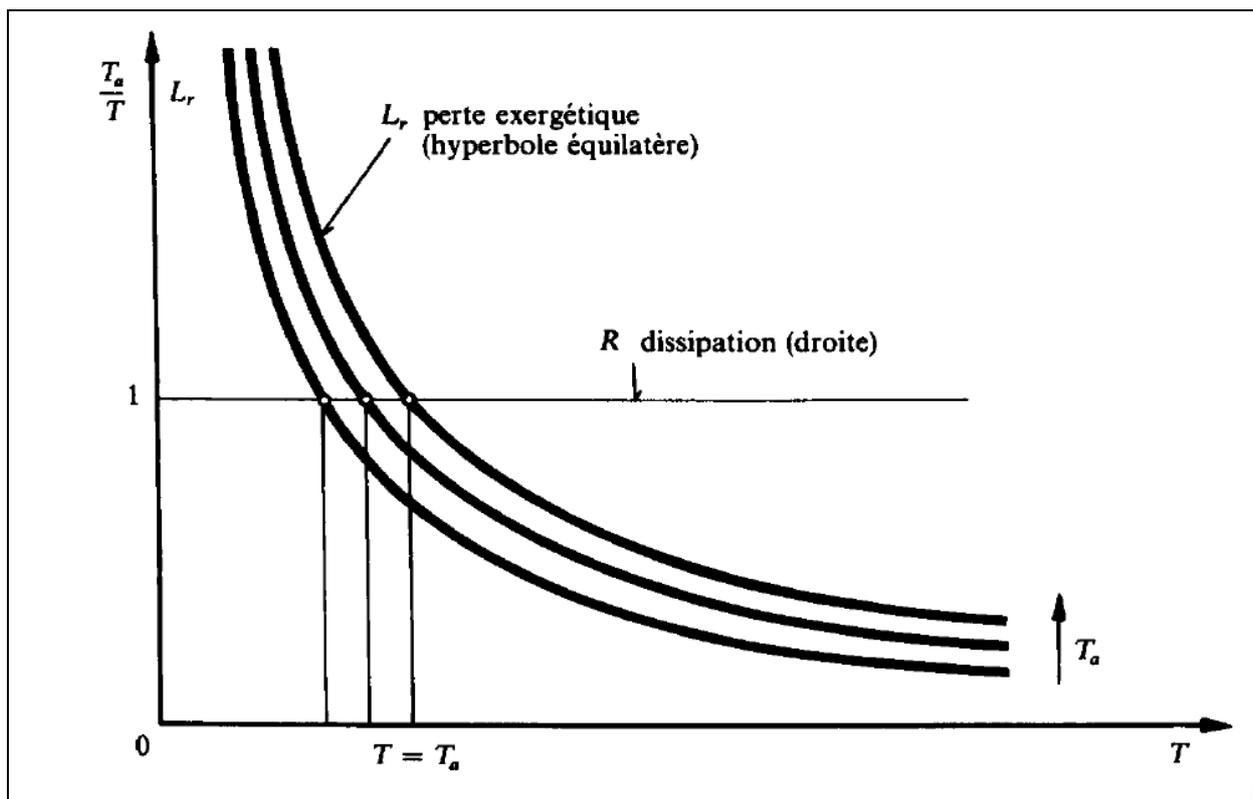


Fig. 2.4 Variation du rapport T_a/T et de la perte exergetique L_r en fonction de la température T , avec en paramètre la température T_a de l'atmosphère [13].

Corrélativement, la perte exergetique est d'autant plus élevée qu'elle se produit a basse température. Cela explique l'un des aspects des difficultés rencontrées dans la technique de très basses températures [13].

Dans le cas général ou la température T est variable, la perte exergetique en énergie L_r est donnée par la relation :

$$L_r = \int \frac{T_a}{T} \delta R \tag{2.53}$$

La perte exergetique en puissance \dot{L}_r est donnée de la même manière par la relation:

$$\dot{L}_r = \int \frac{T_a}{T} \delta \dot{R} \tag{2.54}$$

II.3.1.5-Rendement exergetique

II.3.1.5. a-Définition :

Contrairement au bilan (2.9) exprimant la conservation de l'énergie, le bilan exergetique (2.41) met bien en évidence la notion de perte thermodynamique. Il permet donc de définir la notion de rendement d'une façon claire et logique [13].

Le bilan (2.37) peut, si nous omettons les indices de sommation pour simplifier, être mis sous la forme:

$$\sum [\dot{E}^-] + \sum [\dot{E}_q^-] + \sum [\dot{E}_y^-] = \sum [\dot{E}^+] + \sum [\dot{E}_q^+] + \sum [\dot{E}_y^+] - \dot{L} \tag{2.55}$$

Ou toutes les prestations exergetiques données par le système figurent au premier membre et toutes les prestations exergetiques reçues par le système figurent au second membre.

Nous en déduisons la définition générale:

Dans le cas ou les bilans exergetiques sont donnés, non pas en puissance, mais en énergie, la définition générale du rendement exergetique d'un système quelconque est [13]:

$$\eta = \frac{\sum [E^-] + \sum [E_q^-] + \sum [E_y^-]}{\sum [E^+] + \sum [E_q^+] + \sum [E_y^+]} \tag{2.56}$$

2.3.1.6-Transfert-chaueur avec chute de température :

L'augmentation d'entropie due à un transfert-chaueur avec chute de température est donnée par la relation [13]:

$$\delta S^i = \delta S^t = \left(\frac{1}{T_\beta} - \frac{1}{T_\alpha} \right) \delta Q_{\alpha\beta} \tag{2.59}$$

dans laquelle nous avons:

- $Q_{\alpha\beta}$ énergie-chaleur transférée du corps α au corps β .
- T_α température du corps chaud.
- T_β température du corps froid.

La perte exergetique correspondante est donc, selon (2.42):

$$\delta L_t = \left(\frac{T_\alpha}{T_\beta} - \frac{T_\alpha}{T_\alpha} \right) \delta Q_{\alpha\beta} \quad (2.60)$$

Dans le cas général ou les températures T_β et T_α sont variables, la perte exergetique en énergie L_t est donnée par l'intégrale:

$$L_t = \int \left(\frac{T_\alpha}{T_\beta} - \frac{T_\alpha}{T_\alpha} \right) \delta Q_{\alpha\beta} \quad (2.61)$$

Nous constatons que:

- Pour $T_\alpha = T_\beta$, la perte L_t est nulle.
- Pour $T_\alpha \neq T_\beta$, la perte est d'autant plus élevée que les températures T_α et T_β sont faibles et différentes l'une de l'autre.

Nous avons ainsi montré qu'un transfert-chaleur déterminé conduit à une perte exergetique d'autant plus faible que les températures des deux corps sont élevées et voisines l'une de l'autre.

La relation (2.61) peut aussi être écrite sous la forme:

$$L_t = \int (\theta_\alpha - \theta_\beta) \delta Q_{\alpha\beta}$$

$$L_t = \int \theta_\alpha \delta Q_{\alpha\beta} - \int \theta_\beta \delta Q_{\alpha\beta} \quad (2.62)$$

$$L_t = \dot{E}_{qa}^+ + \dot{E}_{q\beta}^-$$

dans laquelle nous définissons:

- * \dot{E}_{qa}^+ copuissance-chaleur reçue du corps chaud.
- * $\dot{E}_{q\beta}^-$ copuissance-chaleur donnée au corps froid.

La relation (2.62) exprime en fait le bilan exergetique relatif au système intermédiaire entre les deux corps (paroi de séparation), conformément à (2.43). Elle indique que:

La perte exergetique due à un transfert-chaieur avec chute de température est égale à la différence entre la copuissance-chaieur reçue du corps chaud et la copuissance-chaieur donnée au corps froid.

La perte exergetique en puissance \dot{L}_t est donnée de la même manière que ci-dessus, mais en puissance, par la relation:

$$\dot{L}_t = \int \left(\frac{T_a}{T_\beta} - \frac{T_a}{T_\alpha} \right) \delta \dot{Q}_{\alpha\beta} \quad (2.63)$$

II.4. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous exposons les principes fondamentaux des approches énergétique et exergetique. La formulation mathématique de la théorie d'exergie a été donc détaillée. L'analyse exergetique permettra de bien quantifier la qualité thermodynamique de tout système énergétique par une évaluation des pertes et du rendement exergetique global. Ces derniers seront évalués pour une centrale thermique à vapeur. Cette évaluation fera l'objet du chapitre suivant.

III.1- Introduction :

Ce chapitre porte essentiellement sur l'application d l'analyse exergetique d'une centrale thermique à vapeur de l'unité GL1/K de Sonatrach-Skikda. En effet, on va évaluer les pertes thermodynamiques et le rendement exergetique pour chaque organe, ainsi que le rendement exergetique global.

III.2- Analyse exergetique principaux composants d'une centrale thermique à vapeur :

III.2. 1- Analyse exergetique d'une turbine à vapeur.

La turbine schématisée par la (Fig. 3.1) fournit une puissance travail \dot{E}^- . Elle contient un seul corps.

Hypothèses :

- Régime de fonctionnement permanent.
- Les variations des énergies cinétique et potentielle sont négligées.

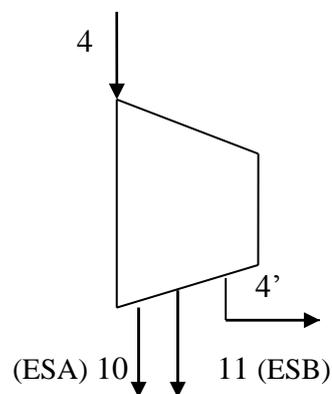


Fig. 3.1 Schéma d'une turbine à vapeur

III.2.1.1- Bilan exergetique de la turbine

Le bilan énergétique est donné par :

$$\dot{E}_w^+ - \dot{E}^- = \dot{L} \rightarrow \dot{E}^- = \dot{E}_w^+ - \dot{L} \quad (3.1)$$

Avec :

\dot{E}_w^+ : copuissance transformation reçue par le système au niveau de la vapeur.

\dot{L} : perte exergetique dans la turbine.

La puissance \dot{E}^- et la copuissance \dot{E}_w^+ sont données par :

$$\dot{E}_w^+ = \sum [k_j \dot{m}_j]. \quad (3.2)$$

$$\dot{E}^- = \sum [h_j \dot{m}_j]. \quad (3.3)$$

Avec :

$(k_j = h_j - T_a S_j)$: coenthalpie total massique du fluide au point j.

h_j : enthalpie total massique du fluide au point j.

T_a : température du milieu ambiant.

S_j : entropie massique du fluide au point j.

\dot{m} : débit masse de la vapeur.

III.2.1.1.a- la Perte exergetique dans la turbine :

Les pertes exergetiques sont le résultat des phénomènes suivants :

- Frottement de la vapeur.
- Tourbillonnement dans les aubages.
- Elles sont nuisibles au bon fonctionnement de la turbine.

La perte exergetique totale \dot{L} est :

$$\dot{L} = \dot{E}_w^+ - \dot{E}^- \quad (3.4)$$

III.2.1.1 .b- Rendement exergetique dans la turbine:

Le rendement exergetique de la turbine est donné par :

$$\eta = \dot{E}^- / \dot{E}_w^+ \quad (3.5)$$

On remplace (3.1) dans (3.5), on trouve :

$$\eta = 1 - \frac{\dot{L}}{\dot{E}_w^+} \quad (3.6)$$

III.2.2- Analyse exergetique du réchauffeur à surface :

La (Fig. 3.2) représente le schéma de principe d'un réchauffeur à surface. Ce dernier est constitué d'une enceinte indéformable. Au niveau de cette enceinte, l'eau reçoit une puissance chaleur de la part de la vapeur.

On a :

\dot{m}_6 : débit masse d'eau

\dot{m}_{11} : débit masse de la vapeur.

Hypothèses :

- Régime de fonctionnement permanent.
- Les variations des énergies cinétique et potentielle sont négligées.

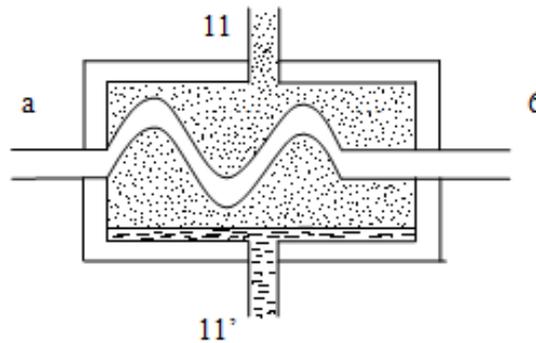


Fig. 3.2 Schéma d'un réchauffeur à surface

III.2.2.1- Bilan exergetique du réchauffeur:

Le bilan exergetique est donnée par :

$$\dot{E}_w^+ - \dot{L} = 0 \rightarrow \dot{E}_w^+ = \dot{L} \quad (3.7)$$

$$\text{D'où :} \quad \dot{E}_w^+ = \dot{E}_{wa}^+ + \dot{E}_{w\beta}^- \quad (3.8)$$

$$\text{Donc :} \quad \dot{E}_{w\beta}^- = \dot{E}_{wa}^+ - \dot{L} \quad (3.9)$$

Avec :

\dot{E}_{wa}^+ : copuissance transformation donnée par le système au niveau du débit masse \dot{m}_{11} .

$\dot{E}_{w\beta}^-$: copuissance transformation reçue par le système au niveau du débit masse \dot{m}_6 .

Par ailleurs, les quantités \dot{E}_{wa}^+ et $\dot{E}_{w\beta}^-$ sont :

$$- \dot{E}_{wa}^+ = \sum [k_j \dot{m}_j]$$

$$\Rightarrow \dot{E}_{wa}^+ = \dot{m}_{11} (k_{11} - k_{11}').$$

$$- \dot{E}_{w\beta}^- = \sum [k_j \dot{m}_j]$$

$$\Rightarrow \dot{E}_{w\beta}^- = \dot{m}_a (k_a - k_6).$$

3.2.2.1.a- La perte exergetique dans le réchauffeur :

Elle est évaluée par l'expression suivante :

$$\dot{L} = \dot{E}_{wa}^+ - \dot{E}_{w\beta}^- \quad (3.10)$$

3.2.2.1.b- Le rendement exergetique du réchauffeur :

Le rendement exergetique du réchauffeur vaut :

$$\eta = \dot{E}_{w\beta}^- / \dot{E}_{wa}^+ = (\dot{E}_{wa}^+ - \dot{L}) / \dot{E}_{wa}^+ \quad (3.11)$$

Donc :

$$\eta = 1 - \frac{\dot{L}}{\dot{E}_{wa}^+} \quad (3.12)$$

III.2.3- Analyse exergetique du condenseur :

La Fig. 3.3 schématise le condenseur d'une installation motrice à vapeur.

Hypothèses :

- Régime de fonctionnement permanent.
- Les variations des énergies cinétique et potentielle sont négligées.
- Condenseur parfaitement calorifuge.
- Pour l'eau de réfrigération, on néglige l'effet de la pression sur l'enthalpie.

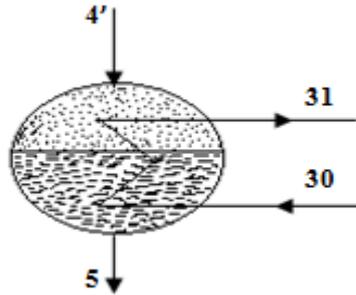


Fig. 3.3 Schéma d'un condenseur

III.2.3.1- Bilan exergetique du condenseur:

Il est donné par :

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{E}_{wv}^+ - \dot{L} \rightarrow \dot{L} = \dot{E}_{wv}^+ - \dot{E}_{we}^- \quad (3.13)$$

Avec :

\dot{E}_{wv}^+ : copuissance transformation reçu par le condenseur au niveau du circuit vapeur.

\dot{E}_{we}^- : copuissance transformation donnée par le condenseur au niveau du circuit eau .

\dot{L} : pertes exergetiques dans le condenser.

En se rapportant à la Fig. 3.3, il vient :

$$\dot{E}_{wv}^+ = \dot{m}_4 k_{4'} - \dot{m}_5 k_5$$

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_{30} (k_{31} - k_{30})$$

III.2.3.1.a- La perte exergetique dans le condenseur:

Elle est donnée par :

$$\dot{L} = \dot{E}_{wv}^+ - \dot{E}_{we}^- \quad (3.14)$$

III.2.3.1.b- Le rendement exergetique du condenseur:

Le rendement exergetique du condenseur est donné par :

$$\eta = \frac{\dot{E}_{we}^-}{\dot{E}_{wv}^+} \quad (3.15)$$

$$\eta = \frac{\dot{E}_{wv}^+ - \dot{L}}{\dot{E}_{wv}^+} \tag{3.16}$$

$$\eta = 1 - \frac{\dot{L}}{\dot{E}_{wv}^+} \tag{3.17}$$

III.2.4- Analyse exergetique de la chaudière :

La Fig. 3.4 donne une image détaillée d'une chaudière industrielle. Au niveau de cette dernière, l'eau liquide entre dans la chaudière au point 1. La chaudière reçoit les gaz de combustion de puissance-chaleur \dot{Q}_c^- . L'eau sorte de la chaudière sous forme de vapeur surchauffée au point 2.

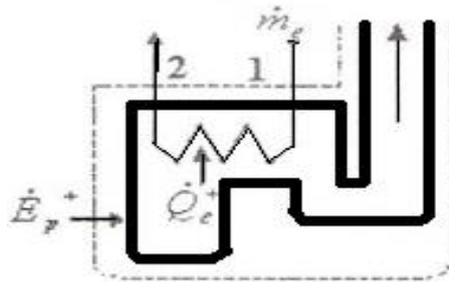


Fig. 3.4 Schéma d'une chaudière industrielle.

III.2.4.1- Bilan exergetique de la chaudière :

Le bilan exergetique de la chaudière est donnée par :

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{E}_{w0}^+ + \dot{E}_p^+ + \dot{L} \rightarrow \dot{L} = \dot{E}_{w0}^+ + \dot{E}_p^+ - \dot{E}_{we}^- \tag{3.18}$$

Avec :

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

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_e (k_2 - k_1)$$

\dot{m}_e est le débit l'eau introduit dans la chaudière.

k_2, k_1 sont respectivement les coenthalpies de l'eau à l'entrée à la sortie de la chaudière .

\dot{E}_{w0}^+ : pouvoir exergetique exprimé en puissance. Il est donné par :

$$\dot{E}_{w0}^+ = \Delta k_0 = \dot{m}_B \Delta k_0 \quad , \quad \dot{m}_B = \frac{\dot{m}_v}{V_m} \quad (\dot{m}_v : \text{débit volumique et } V_m : \text{volume molaire}).$$

Il vient :

$$\dot{E}_{w0}^+ = \frac{\dot{m}_v}{V_m} \Delta k_0$$

\dot{E}_p^+ : puissance électrique des moteurs de la pompe à combustible et des ventilateurs.

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

III.2.4.1. a- La perte exergetique dans la chaudière:

Elle est donnée par :

$$\dot{L} = \dot{E}_{w0}^+ + \dot{E}_p^+ - \dot{E}_{we}^- \quad (3.19)$$

III.2.4.1. b- Le rendement exergetique du chaudiere :

Le rendement exergetique de la chaudière est :

$$\eta = \frac{\dot{E}_{we}^-}{\dot{E}_{w0}^+ + \dot{E}_p^+} \quad (3.20)$$

III.2.5. La perte totale \dot{L}_t dans l'installation :

La perte totale n'est que la somme des pertes de chaque organe. Elle est donnée par :

$$\dot{L}_{tot} = \dot{L}_{tur} + \dot{L}_{con} + \dot{L}_{re1} + \dot{L}_{re2} + \dot{L}_{cho} \quad (3.21)$$

III.2.5. a - contribution de la perte dans le condenseur :

Elle est donné par :

$$\frac{\dot{L}_{con}}{\dot{L}_{tot}} = \% \quad (3.22)$$

III.2.5. b - contribution de la perte dans la turbine:

Elle est donné par :

$$\frac{\dot{L}_{tur}}{\dot{L}_{tot}} = \% \quad (3.23)$$

III.2.5. c - contribution de la perte dans le réchauffeur (2) :

Elle est donné par :

$$\frac{\dot{L}_{re2}}{\dot{L}_{tot}} = \% \quad (3.24)$$

III.2.5. d- contribution de la perte dans le réchauffeur (1) :

Elle est donné par :

$$\frac{\dot{L}_{re1}}{\dot{L}_{tot}} = \% \quad (3.25)$$

III.2.5. e- contribution de la perte dans la chaudière :

Elle est donné par :

$$\frac{\dot{L}_{cho}}{\dot{L}_{tot}} = \% \quad (3.26)$$

III.2.6- Le rendement exergetique totale d'une centrale :

Le rendement exergetique d'une installation motrice à vapeur s'exprime par :

$$\eta = 1 - \frac{\dot{L}_t}{\dot{E}_p^+ + \dot{E}_{w0}^+} \quad (3.27)$$

Avec:

\dot{L}_t : perte exergetique totale.

\dot{E}_p^+ : puissance électrique des moteurs de la pompe à combustible et des ventilateurs.

III.2.7- Le rendement énergetique d'une centrale :

Le rendement énergetique d'une installation motrice à vapeur s'exprime par :

$$\eta = 1 - \frac{\dot{E}_t^-}{\dot{E}_p^+ + \dot{Q}_C} \quad (3.28)$$

Avec:

\dot{Q}_C : pouvoir énergetique exprimé en puissance.

\dot{E}_t^- : puissance transformation donnée par la turbine.

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_B \Delta h_{0i}$$

Δh_{0i} est le pouvoir énergetique du combustible à P_0 et T_0 .

P_0 et T_0 sont la pression et la température de référence.

Il est en fonction du pouvoir calorifique de chaque composante du combustible. Il s'exprime comme suit :

$$\Delta h_{0i} = (x_{CH_4})^2 \Delta k_{CH_4} + (x_{C_2H_6})^2 \Delta k_{C_2H_6} + (x_{C_3H_8})^2 \Delta k_{C_3H_8} + (x_{C_4H_{10}})^2 \Delta k_{C_4H_{10}} + (x_{C_5H_{12}})^2 \Delta k_{C_5H_{12}}$$

III.3- Description de la centrale étudiée :

La centrale thermique étudiée appartient à l'unité GL1/K de l'entreprise Sonatrach-SKIKDA [15]. Elle contient les éléments suivants :

- 1- Chaudière.
- 2- Turbine à vapeur.
- 3- Condenseur.
- 4- Poste d'eau :

- Les Pompes d'extraction et alimentaire.
- Les réchauffeurs.
- Bâche alimentaire.

III.3.1- Schéma de principe de la centrale :

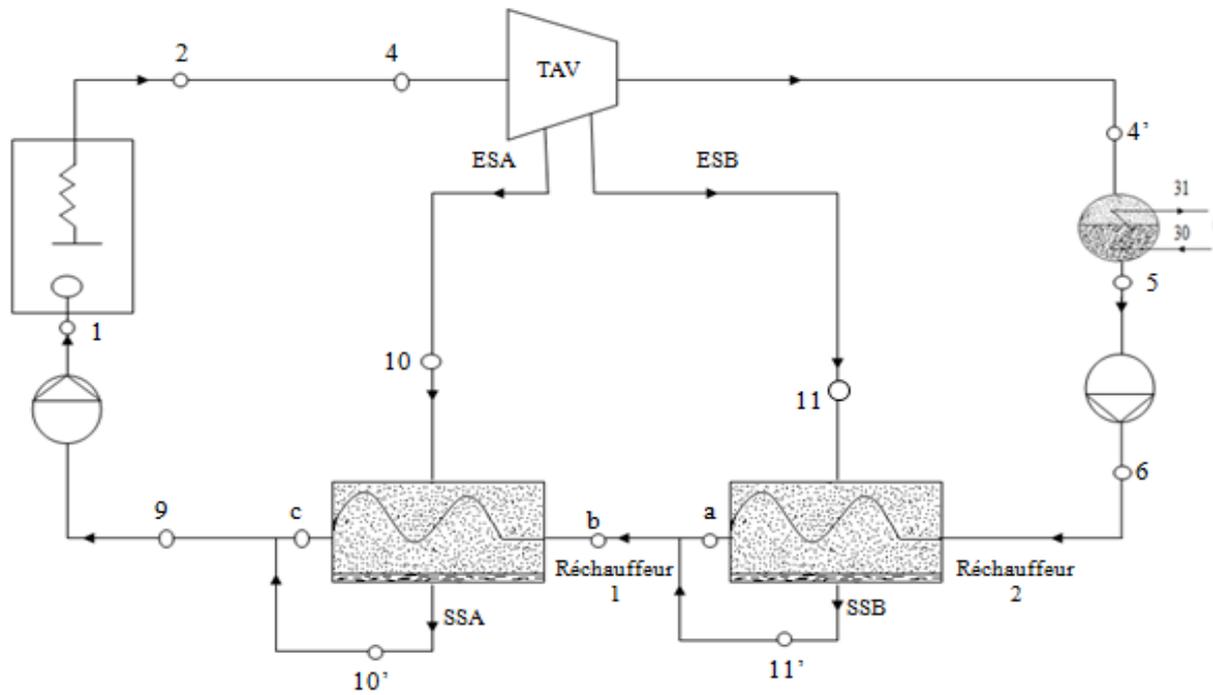


Fig. 3.5 Schéma de principe de la centrale thermique étudiée

La chaudière utilise comme combustible du gaz naturel, dont la composition volumique est la suivante :

Constituant	Formule chimique	% volumique	Pouvoir énergétique Δh_{oi} (kj/kmol)	Pouvoir exergetique Δh_0 (kj/kmol)
Méthane	CH ₄	83,50	802300	829800
Ethane	C ₂ H ₆	6,90	1427800	1493200
Propane	C ₃ H ₈	2,1	2044000	2148000
Butane	C ₄ H ₁₀	0,88	2657000	2801200
Pentane	C ₅ H ₁₂	0,23	3272100	3454100
Azote	N ₂	0,85	-	-
Autre gaz	-	0,54	-	-

Tableau. 3.1 La composition volumique du gaz naturel

III.3.2- Principe de fonctionnement d'une centrale :

Après l'alimentation de la chaudière par l'eau, une combustion est produite dans la chambre de combustion en dégageant une quantité de chaleur qui chauffe et vaporise l'eau qui circule dans les tubes tapissant les parois de cette chambre.

La vapeur saturante humide formée est envoyée dans le ballon, le rôle de ce dernier est très important car il permet de séparer la vapeur du liquide.

La vapeur saturante sèche (ne contient pas de gouttelettes d'eau liquide) quitte le ballon et passe par les surchauffeurs de la chaudière en bénéficiant d'une augmentation d'enthalpie, après elle traverse la turbine se détend dans une turbine et abandonne une grande partie de son énergie.

La vapeur qui s'échappe de la turbine se dirige vers le condenseur. Après le changement de phase "vapeur-liquide" (condensation) dans le condenseur, il vient le rôle des pompes d'extraction pour extraire les condensats (c.à.d. l'eau située dans le fond du condenseur) et qui sont refoulés dans les réchauffeurs (1 et 2) alimentés par de la vapeur de soutirage, pour y arriver en fin dans la bêche alimentaire avec le système dégazage.

La bêche alimentaire constitue à la fois un réchauffeur particulier et une réserve d'eau, le dégazeur assure une teneur très faible en (O₂) dissous dans l'eau afin de limiter la corrosion des matériaux tel que les aubages de la turbine et les aubes de générateur de vapeur.

Une fois l'eau est dégazée, il pénètre dans la bêche alimentaire, ensuite vient le rôle des pompes alimentaires qui effectuent une pression importante sur l'eau avant de la refouler dans la chaudière et le circuit tourne de nouveau.

Le refroidissement est assuré soit à l'aide de l'eau de mer ou l'eau d'un fleuve dans le cas d'un circuit ouvert et à l'aide de l'eau d'un circuit de réfrigération dans les cas d'un circuit fermé. Le condenseur travaille presque sous vide, la réalisation du vide est assurée par des pompes à vide.

Remarque :

Au niveau de l'unité 10 GL1/K (Sonatrach de Skikda), la turbine est entraînée par un compresseur axial.

Compresseur :

Rôle : le compresseur est un équipement très important dans l'unité de liquéfaction qui produit du gaz naturel liquide (GNL). Le compresseur permettra de transmettre au fluide frigorigène (MCR) l'énergie utile pour liquéfier le gaz naturel dans des boîtes froides. Le compresseur est de type axial AV8018 à simple corps et 13 étages entraîné par une turbine de

type DSS Q2-42. Le compresseur fait circuler le MCR avec une pression d'aspiration de 3.5 bars et une pression de refoulement de 21.5 bars.

Il fonctionne à une vitesse constante de l'ordre de 3430 tr / min.

III.4- Analyse exergetique des différents composants de la centrale étudiée :

L'analyse exergetique des différents éléments de la centrale, dont l'objectif principale est de déterminer le rendement exergetique globale, a été effectuée pour deux dates différentes espacées d'une semaine.

III.4.1- Bilan de la Date 1 :

III.4.1.1- Propriétés thermodynamiques : Elles sont regroupées dans le Tableau 3.2.

Point	Débit (T/H)	Température e (°C)	Pression (bar)	Enthalpie (Kj/Kg)	Entropie (Kj/KKg)	Fraction	état
(1)	295	132	92	560,696	1,62	0	Liq.Sat
(2)	29	490	64	3392,564	6,73	1	Vap. Sat
Entrée utilité (3)	32.9	490	64	3392,564	6,73	1	Vap. Sat
Entrée TVA (4)	262.1	490	64	3392,564	6,73	1	Vap. Sat
Sortie TVA (4')	223.2	45.5	0.08	2137,667	6,97	0,819	mélange
Sortie condenseur (5)	223.2	45.5	0,08	190,499	0,55	0	Liq.Sat
Entrée soutirage (B) (ESB)(11)	15 ,7	90	0,08	2417,102	6,94	0,894	mélange
sortie soutirage (B) (SSB)(11')	15,7	70	0,08	359,89	0,99	0	Liq.Sat
Entrée soutirage (A) (ESA)(10)	19,2	128.7	2,61	2417,098	6,356	0,894	mélange
sortie soutirage (A) (SSA)(10')	19,2	115	2,61	544,284	1,48	0	Liq. Sat.
Sortie réchauffer (2) (a)	223.2	60	5	335,204	0,89	0	Liq.Sat
Sortie mixte (b)	238.9	63.18	5	347, 504	0,92	0	Liq.Sat
Sortie réchauffer (1) (c)	238.9	112	2,6	497,977	1,47	0	Liq.Sat
Sortie bache alimentaire (9)	295	132	2,6	560,692	1,62	0	Liq.Sat
(6)	223,2	50	8	230	0,75	0	Liq.Sat
(30)	3360	16.5	1,70	69,42	0,2462	0	Liq.Sat
(31)	3360	22.60	1,20	90,42	0,3334	0	Liq.Sat

Tableau. 3.2 Propriétés thermodynamiques (date 1)

III.4.1.2- Diagramme (T – S) :

Le circuit eau-vapeur dans la centrale étudié est schématisé dans le diagramme entropique (T-S) (Fig. 3.7).

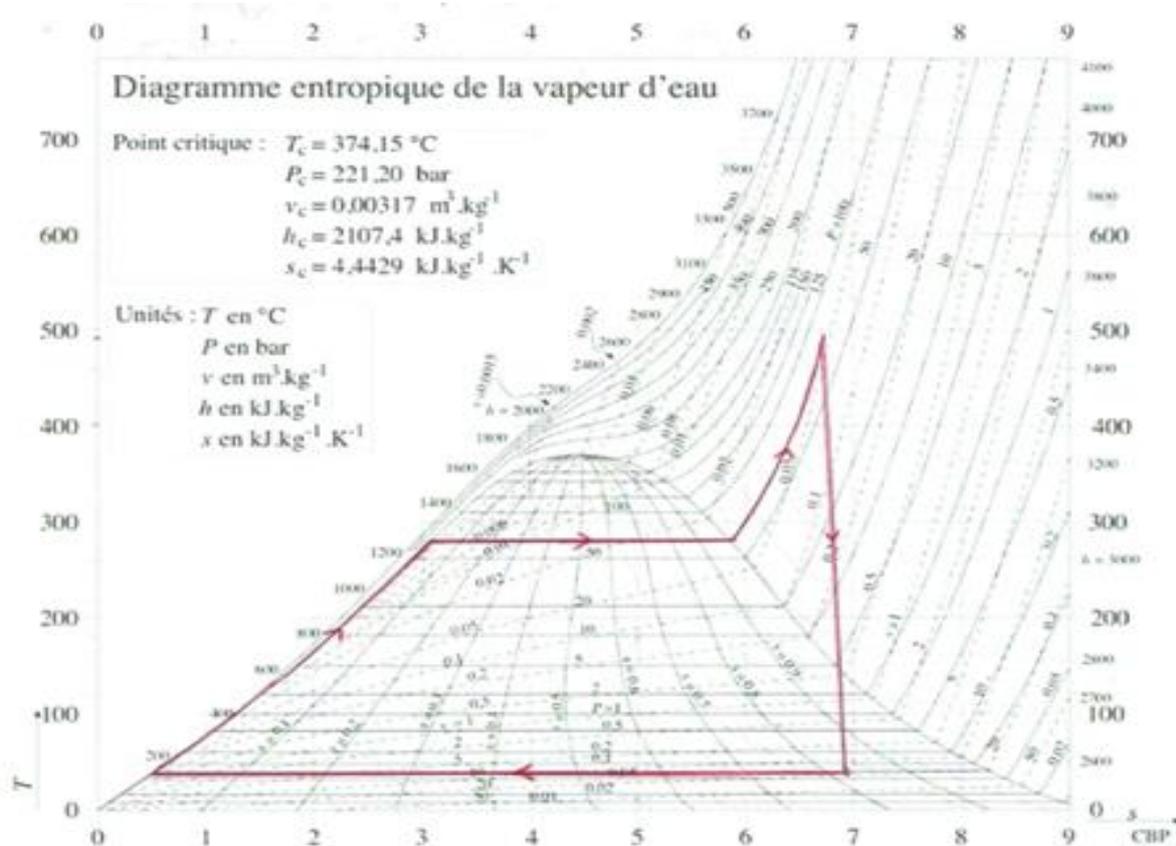


Fig. 3.7 diagramme entropique de la vapeur d'eau (date1)

* Détermination de la caractéristique inconnue (Entropie S):

Au départ, on a seulement comme données les valeurs de la température, de la pression, du débit et de l'enthalpie. Comme il est bien visualisé dans le chapitre II, la fonction exergie (coenthalpie) est fonction, en plus de l'enthalpie, de l'entropie S . Donc, il est très utile d'avoir les valeurs de S . En effet, on peut les avoir à l'aide du diagramme entropique (T-S).

Les valeurs des entropies sont données dans le Tableau 3.2.

III.4.1.3- Bilan exergetique de la turbine à vapeur

Le bilan exergetique s'exprime par :

$$\dot{E}_w^+ - \dot{E}^- = \dot{L} \rightarrow \dot{E}^- = \dot{E}_w^+ - \dot{L} \quad (3.29)$$

- **Calcul des termes de l'équation (3.29):**

- La copuissance transformation reçue par le système au niveau de la vapeur :

$$\dot{E}_w^+ = \sum [k_j \dot{m}_j]$$

$$\dot{E}_w^+ = \frac{1000}{3600} (\dot{m}_4 \times K_4) - (\dot{m}_{10} \times K_{10} + \dot{m}_{11} \times K_{11} + \dot{m}_{4'} \times K_{4'})$$

$$K_4 = h_4 - Ta.S_4 \rightarrow K_4 = 3392,564 - 20(6,73) \rightarrow K_4 = 3257,964 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$K_{10} = h_{10} - Ta.S_{10} \rightarrow K_{10} = 2417,098 - 20(6,356) \rightarrow K_{10} = 2289,978 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$K_{11} = h_{11} - Ta.S_{11} \rightarrow K_{11} = 2417,102 - 20(6,92) \rightarrow K_{11} = 2278,702 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$K_{4'} = h_{4'} - Ta.S_{4'} \rightarrow K_{4'} = 2137,667 - 20(6,97) \rightarrow K_{4'} = 1998,267 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$\dot{E}_w^+ = \frac{1000}{3600} (262,1 \times 3257,964) - (19,2 \times 2289,978 + 15,7 \times 2278,702 + 1998,267 \times 223,2)$$

$$\dot{E}_w^+ = 91154,43639 \left[\frac{KJ}{S} \right] = [Kw].$$

- La puissance transformation donnée par le système au niveau de la vapeur

$$\dot{E}^- = \sum [h_j \dot{m}_j]$$

$$\dot{E}^- = \frac{1000}{3600} (h_4 \times \dot{m}_4) - (h_{10} \times \dot{m}_{10} + h_{11} \times \dot{m}_{11} + h_{4'} \times \dot{m}_{4'})$$

$$\dot{E}^- = \frac{1000}{3600} (262,1 \times 3392,564) - (19,2 \times 2417,098 + 15,7 \times 2417,102 + 2137,667 \times 223,2)$$

$$\dot{E}^- = 91029,71306 \left[\frac{KJ}{S} \right] = [Kw].$$

III.4.1.3. a- la perte exergetique dans la turbine:

$$\dot{L} = \dot{E}_w^+ - \dot{E}^-$$

$$\dot{L} = 91154,43639 - 91029,71306$$

$$\dot{L} = 124,7233389 \left[\frac{KJ}{S} \right] = [Kw].$$

III.4.1.3. b- Le rendement exergetique dans la turbine :

$$\eta = 1 - \frac{\dot{L}}{\dot{E}_w^+}$$

$$\eta = 1 - \frac{124,7233389}{91154,43639} = 99,86\%$$

III.4.1.4- Bilan exergetique du Réchauffeur 2 :

Le bilan exergetique s'exprime par :

$$\dot{E}_w^+ - \dot{L} = 0 \rightarrow \dot{E}_w^+ = \dot{L} \quad (3.30)$$

$$\text{D'où :} \quad \dot{E}_w^+ = \dot{E}_{wa}^+ + \dot{E}_{w\beta}^-$$

$$\text{Donc :} \quad \dot{E}_{w\beta}^- = \dot{E}_{wa}^+ - \dot{L}$$

- Calcul des termes de l'équation (3.30) :

- La copuissance transformation donnée par le système au niveau du débit masse \dot{m}_{11} .

$$\dot{E}_{wa}^+ = \sum [k_j \dot{m}_j]$$

$$\dot{E}_{wa}^+ = \frac{1000}{3600} \dot{m}_{11} (k_{11} - k_{11'})$$

$$K_{11} = h_{11} - T_a \cdot S_{11} \rightarrow K_{11} = 2417,102 - 20(6,90) \rightarrow K_{11} = 2279,102 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$K_{11'} = h_{11'} - T_a \cdot S_{11'} \rightarrow K_{11'} = 359,89 - 20(0,99) \rightarrow K_{11'} = 340,09 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$\dot{E}_{wa}^+ = \frac{1000}{3600} (\dot{m}_{11})(k_{11} - k_{11'})$$

$$\dot{E}_{wa}^+ = \frac{1000}{3600} (15,7)(2278,82 - 340,09)$$

$$\dot{E}_{wa}^+ = 8455,019440 \left[\frac{KJ}{S} \right] = [Kw]$$

- La copuissance transformation reçue par le système au niveau du débit masse \dot{m}_a .

$$\dot{E}_{w\beta}^- = \sum [k_j \dot{m}_j]$$

$$K_a = h_a - T_a \cdot S_a \rightarrow K_a = 235,204 - 20(0,9) \rightarrow K_a = 317,204 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$K_6 = h_6 - T_a \cdot S_6 \rightarrow K_6 = 230 - 20(0,75) \rightarrow K_6 = 215 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$\dot{E}_{w\beta}^- = \frac{1000}{3600} (\dot{m}_a) (k_a - k_6).$$

$$\dot{E}_{w\beta}^- = \frac{1000}{3600} (223,2)(317,404 - 215).$$

$$\dot{E}_{w\beta}^- = 6349,048 \left[\frac{KJ}{S} \right] = [Kw].$$

III.4.1.4.a- La perte exergetique dans le Réchauffeur 2:

$$\dot{L} = \dot{E}_{wa}^+ - \dot{E}_{w\beta}^-$$

$$\dot{L} = 8455,019440 - 6349,048$$

$$\dot{L} = 2106,841167 \left[\frac{KJ}{S} \right] = [Kw].$$

III.4.1.4.b- Le rendement exergetique du Réchauffeur 2:

$$\eta = 1 - \frac{\dot{L}}{\dot{E}_{wa}^+}$$

$$\eta = 1 - \frac{2106,841167}{8455,019440} = 75,08\%.$$

III.4.1.5- Bilan exergetique du Réchauffeur 1 :

Le bilan exergetique s'exprime par :

$$\dot{E}_w^+ - \dot{L} = 0 \rightarrow \dot{E}_w^+ = \dot{L} \quad (3.31)$$

$$\text{D'où :} \quad \dot{E}_w^+ = \dot{E}_{wa}^+ + \dot{E}_{w\beta}^-$$

$$\text{Donc :} \quad \dot{E}_{w\beta}^- = \dot{E}_{wa}^+ - \dot{L}$$

- Calcul des termes de l'équation (3.31):

- La copuissance transformation donnée par le système au niveau du débit masse \dot{m}_{10} .

$$\dot{E}_{wa}^+ = \sum [k_j \dot{m}_j].$$

$$\dot{E}_{wa}^+ = \frac{1000}{3600} \dot{m}_{10} (k_{10} - k_{10'})..$$

$$K_{10} = h_{10} - Ta.S_{10} \rightarrow K_{10} = 2417,098 - 20(6,356) \rightarrow K_{10} = 2289,978 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_{10'} = h_{10'} - Ta.S_{10'} \rightarrow K_{10'} = 544,284 - 20(1,48) \rightarrow K_{10'} = 514,684 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$\dot{E}_{wa}^+ = \frac{1000}{3600} (19,2)(2289,978 - 514,684).$$

$$\dot{E}_{wa}^+ = 9468,234667 \left[\frac{KJ}{S} \right] = [Kw].$$

- La copuissance transformation reçu par le système au niveau du débit masse \dot{m}_c .

$$\dot{E}_{w\beta}^- = \sum [k_j \dot{m}_j].$$

$$\dot{E}_{w\beta}^- = \frac{1000}{3600} (\dot{m}_c) (k_c - k_b).$$

$$K_c = h_c - T_a.S_c \rightarrow K_c = 497,977 - 20(1,47) \rightarrow K_c = 468,577 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_b = h_b - T_a.S_b \rightarrow K_b = 347,977 - 20(0,92) \rightarrow K_b = 329,577 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$\dot{E}_{w\beta}^- = \frac{1000}{3600} (238,9)(468,577 - 329,577).$$

$$\dot{E}_{w\beta}^- = 9224,1944 \left[\frac{KJ}{S} \right] = [KW].$$

III.4.1.5.a- La perte exergetique dans le Réchauffeur 1:

$$\dot{L} = \dot{E}_{wa}^+ - \dot{E}_{w\beta}^-$$

$$\dot{L} = 9468,234667 - 9224,1944$$

$$\dot{L} = 244,0402667 \left[\frac{KJ}{S} \right] = [KW].$$

III.4.1.5.b- Le rendement exergetique du Réchauffeur 1:

$$\eta = 1 - \frac{\dot{L}}{\dot{E}_{wa}^+}$$

$$\eta = 1 - \frac{244,0402667}{9468,234667} = 92,25\%.$$

III.4.1.6- Bilan exergetique de la chaudière :

Le bilan exergetique s'exprime par :

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{E}_{w0}^+ + \dot{E}_p^+ + \dot{L} \rightarrow \dot{L} = \dot{E}_{w0}^+ + \dot{E}_p^+ - \dot{E}_{we}^- \quad (3.32)$$

- Calcul des termes de l'équation (3.32):

- La copuissance transformation du réseau d'eau :

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_e (k_2 - k_1)$$

$$K_2 = h_2 - T_a \cdot S_2 \rightarrow K_2 = 3392,564 - 20(6,73) \rightarrow K_2 = 3257,964 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_1 = h_1 - T_a \cdot S_1 \rightarrow K_1 = 560,696 - 20(1,62) \rightarrow K_1 = 528,296 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$\dot{E}_{we}^- = \frac{1000}{3600} (295)(3257,964 - 528,296).$$

$$\dot{E}_{we}^- = 223681,12777 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw].$$

$$\dot{E}_{w0}^+ = \Delta k_0 = \dot{m}_B \Delta k_0$$

- Le pouvoir exergetique exprime en puissance :

$$\dot{E}_{w0}^+ = \frac{\dot{m}_v}{V_m} \Delta k_0$$

$$\dot{m}_v = 39220 \left[\frac{m^3}{h} \right].$$

$$V_m = 22414 \left[\frac{m^3}{Kmol} \right].$$

$$\Delta k_0 = x_{CH_4} \Delta k_{CH_4} + x_{C_2H_6} \Delta k_{C_2H_6} + x_{C_3H_8} \Delta k_{C_3H_8} + x_{C_4H_{10}} \Delta k_{C_4H_{10}} + x_{C_5H_{12}} \Delta k_{C_5H_{12}}.$$

$$\Delta k_0 = (0,8350 \times 829800) + (0,0690 \times 149200) + (0,021 \times 24800) + (0,0088 \times 280120) + (0,0023 \times 3454100).$$

$$\Delta k_0 = 873616,79 \left[\frac{KJ}{Kmol} \right]$$

$$\dot{E}_{w0}^+ = \frac{1}{3600} \left(\frac{392200}{22414} * 873616,79 \right).$$

$$\dot{E}_{w0}^+ = 424626,108 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw].$$

III.4.1.6.a- La perte exergetique totale dans la chaudiere:

$$\dot{L} = \dot{E}_{w0}^+ + \dot{E}_p^+ - \dot{E}_{we}^-$$

$$\dot{E}_p^+ = 500 [Kw]$$

$$\dot{L} = (424626,108 + 500) - 223681,12777$$

$$\dot{L} = 201444,83022 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw].$$

III.4.1.6.b- Le rendement exergetique de la chaudière :

$$\eta = \frac{201444,83022}{424626,108 + 500} = 52,61\%$$

III.4.1.7- Bilan exergetique du condenseur :

Le bilan exergetique s'exprime par :

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{E}_{wv}^+ - \dot{L} \rightarrow \dot{L} = \dot{E}_{wv}^+ - \dot{E}_{we}^- \quad (3.33)$$

- Calcul des termes de l'équation (3.33):

- La copuissance transformation reçu par le condenseur au niveau du circuit vapeur.

$$\dot{E}_{wv}^+ = \dot{m}_{4'} (k_5 - k_{4'})$$

$$K_{4'} = h_{4'} - T_a.S_{4'} \rightarrow K_{4'} = 2137,667 - 20(6,97) \rightarrow K_{4'} = 1998,267 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_5 = h_5 - T_a.S_5 \rightarrow K_5 = 190,499 - 20(0,55) \rightarrow K_5 = 179,499 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$\dot{E}_{wv}^+ = \frac{1000}{3600} (223,2)(1998,267 - 179,499).$$

$$\dot{E}_{wv}^+ = 112763,616 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

- la copuissance transformation donnée par le condenseur au niveau du circuit eau.

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_{30} (k_{31} - k_{30}).$$

$$K_{31} = h_{31} - T_a.S_{31} \rightarrow K_{31} = 94,90 - 20(0,3334) \rightarrow K_{31} = 88,232 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_{30} = h_{30} - T_a.S_{30} \rightarrow K_{30} = 69,42 - 20(0,2462) \rightarrow K_{30} = 64,492 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$\dot{E}_{we}^- = \frac{1000}{3600} (3360)(88,232 - 64,492).$$

$$\dot{E}_{we}^- = 79766,4 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

III.4.1.7.a- La perte exergetique dans le condenseur:

$$\dot{L} = \dot{E}_{wv}^+ - \dot{E}_{we}^-.$$

$$\dot{L} = 112763,616 - 79766,4$$

$$\dot{L} = 32997,216 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

III.4.1.7.b - Le rendement exergetique du condenseur:

$$\eta = 1 - \frac{\dot{L}}{\dot{E}_{wv}^+}$$

$$\eta = 1 - \frac{32997,216}{112763,616} = 70,73 \%$$

III.4.1.8- Bilan exergetique de la Pompe d'extraction :

- La copuissance transformation reçu par la pompe d'extraction au niveau du circuit eau

$$\dot{E}_{wv}^+ = \dot{m}_5 (k_6 - k_5) .$$

$$k_5 = h_5 - Ta.S_5 \rightarrow K_5 = 190,499 - 20(0,55) \rightarrow K_5 = 179,499 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_6 = h_6 - Ta.S_6 \rightarrow K_6 = 230 - 20(0,75) \rightarrow K_6 = 215 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$\dot{E}_w^+ = \frac{1000}{3600} (223,2)(215 - 179,499).$$

$$\dot{E}_w^+ = 2201,062 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

III.4.1.9- Bilan exergetique de la Pompe alimentaire:

- La copuissance transformation reçu par la pompe alimentaire au niveau du circuit eau

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_1 (k_1 - k_9) .$$

$$K_1 = h_1 - Ta.S_1 \rightarrow K_1 = 560,696 - 20(1,62) \rightarrow K_1 = 528,296 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_9 = h_9 - T_a \cdot S_9 \rightarrow K_9 = 560,692 - 20(1,62) \rightarrow K_9 = 528,292 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$\dot{E}_w^+ = \frac{1000}{3600} (295)(528,296 - 528,292).$$

$$\dot{E}_w^+ = 0,327 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

III.4.1.10- La perte totale \dot{L}_t :

La perte exergetique totale est donnee par la formule (3.21). Le calcul donne :

$$\dot{L}_t = 32997,216 + 124,7233389 + 2106,841167 + 244,0402667 + 201444,83022$$

$$\dot{L}_t = 236917,650992 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw].$$

III.4.1.10.a- Contribution de la perte au niveau du condenseur :

En utilisant la formule (3.22), on trouve :

$$\frac{32997,216}{236917,650992} = 0,1392 \rightarrow 13.82 \%$$

III.4.1.10.b- Contribution de la perte au niveau de la turbine:

En utilisant la formule (3.23), on trouve :

$$\frac{124,7233389}{236917,650992} = 0,0005 \rightarrow 0.052 \%$$

III.4.1.10.c- Contribution de la perte au niveau du rechauffeur (2) :

En utilisant la formule (3.24), on trouve :

$$\frac{2106,841167}{236917,650992} = 0,00889 \rightarrow 0.889 \%$$

III.4.1.10.d- Contribution de la perte au niveau du rechauffeur (1) :

En utilisant la formule (3.25), on trouve :

$$\frac{244,0402667}{236917,650992} = 0,001 \rightarrow 0.103 \%$$

III.4.1.10.e - Contribution de la perte au niveau de la chaudière :

En utilisant la formule (3.26), on trouve :

$$\frac{201444,83022}{236917,650992} = 0,8502 \rightarrow 85.02\%$$

III.4.1.11. Le rendement exergétique total de la centrale thermique étudiée:

En utilisant la formule du rendement exergétique total :

$$\eta = 1 - \frac{\dot{L}_t}{\dot{E}_p^+ + \dot{E}_{w0}^+}$$

Il vient :

$$\eta = 1 - \frac{236917,650992}{424626,108 + 500} = 0,4427 \rightarrow 44,27 \%$$

$$\eta = 44,27 \%$$

III.4.1.12- Le rendement énergétique de la centrale thermique étudiée :

En utilisant la formule du rendement exergétique total :

$$\eta = 1 - \frac{\dot{E}_t^-}{\dot{E}_p^+ + \dot{Q}_C} \quad (3.34)$$

- Calcul des termes de l'équation (3.33) :

- Calcul du pouvoir énergétique \dot{Q}_C .

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_B \Delta h_{0i}$$

$$\Delta h_{0i} = (x_{CH_4})^2 \Delta k_{CH_4} + (x_{C_2H_6})^2 \Delta k_{C_2H_6} + (x_{C_3H_8})^2 \Delta k_{C_3H_8} + (x_{C_4H_{10}})^2 \Delta k_{C_4H_{10}} + (x_{C_5H_{12}})^2 \Delta k_{C_5H_{12}}$$

$$\Delta h_{0i} = (0,83)^2 \times 802300 + (0,0690)^2 \times 1427800 + (0,021)^2 \times 2044000 +$$

$$(0,0088)^2 \times 265700 + (0,0023)^2 \times 3242100.$$

$$\Delta h_{0i} = 560542,8933 \left[\frac{KJ}{Kmol} \right].$$

$$\dot{Q}_C = 0.486 \times 560542,8933.$$

$$\dot{Q}_C = 272423,8461 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

- la puissance transformation donnée par la turbine.

$$\dot{E}_t^- = 91029,71306 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

$$\dot{E}_p^+ = 500 \text{ Kw (valeur donnée).}$$

Finalement, le rendement énergétique est :

$$\eta = 1 - \frac{91029,71306}{272423,8461 + 500} = 0,6666 \rightarrow 66,66 \%$$

3.4.2- Bilan de la Date 2 :

3.4.2.1- Propriétés thermodynamique : Elles sont regroupées dans le Tableau 3.3.

Point	Débit (T/H)	Température (°C)	Pression (bar)	Enthalpie (Kj/Kg)	Entropie (Kj/KKg)	Fraction	état
(1)	310	130	90	552,238	1,64	0	Liq.Sat
(2)	310	485	64	3380,422	6,76	1	Vap.Sat
Entrée utilité (3)	30	485	64	3380,422	6,76	1	Vap.Sat
Entrée TVA (4)	280	485	64	3380,422	6,76	1	Vap.Sat
Sortie TVA (4')	245,1	45.72	0.10	2150,692	6,88	0,819	mélange
Sortie condenseur (5)	245,1	45.72	0,10	191,420	0,48	0	liquide
Entrée soutirage(B) (ESB)(11)	15 ,7	90	0,70	2417,102	6,9	0,894	mélange
sortie soutirage(B) (SSB)(11')	15,7	70.3	0,70	359,80	1	0	Liq.Sat
Entrée soutirage(A) (ESA)(10)	19,2	128.7	2,61	2417,098	6,35	0,894	mélange
sortie soutirage(A) (SSA)(10')	19,2	115.3	2,61	544,29	1,52	0	Liq.Sat
Sortie réchauffer (2) (a)	245,1	58.1	5	323,2	0,84	0	Liq.Sat
Sortie mixte (b)	260 ,8	62.9	5	347	0,88	0	liquide
Sortie réchauffer (1) (c)	260,8	112.3	2,6	483,3	1,48	0	liquide
Sortie bache alimentaire (9)	310	130	2,6	552,23	1,64	0	liquide
(6)	245,1	51	8,5	276	0,76	0	liquide
(30)	3360	16.5	1,70	69,42	0,2462	0	liquide
(31)	3360	22.60	1,20	90,42	0,3334	0	liquide

Tableau.3.3 Propriétés thermodynamiques (Date 2)

3.4.2.2- Diagramme (T – S) :

Le circuit eau-vapeur dans la centrale étudié est schématisé dans le diagramme entropique (T-S) (Fig. 3.8).

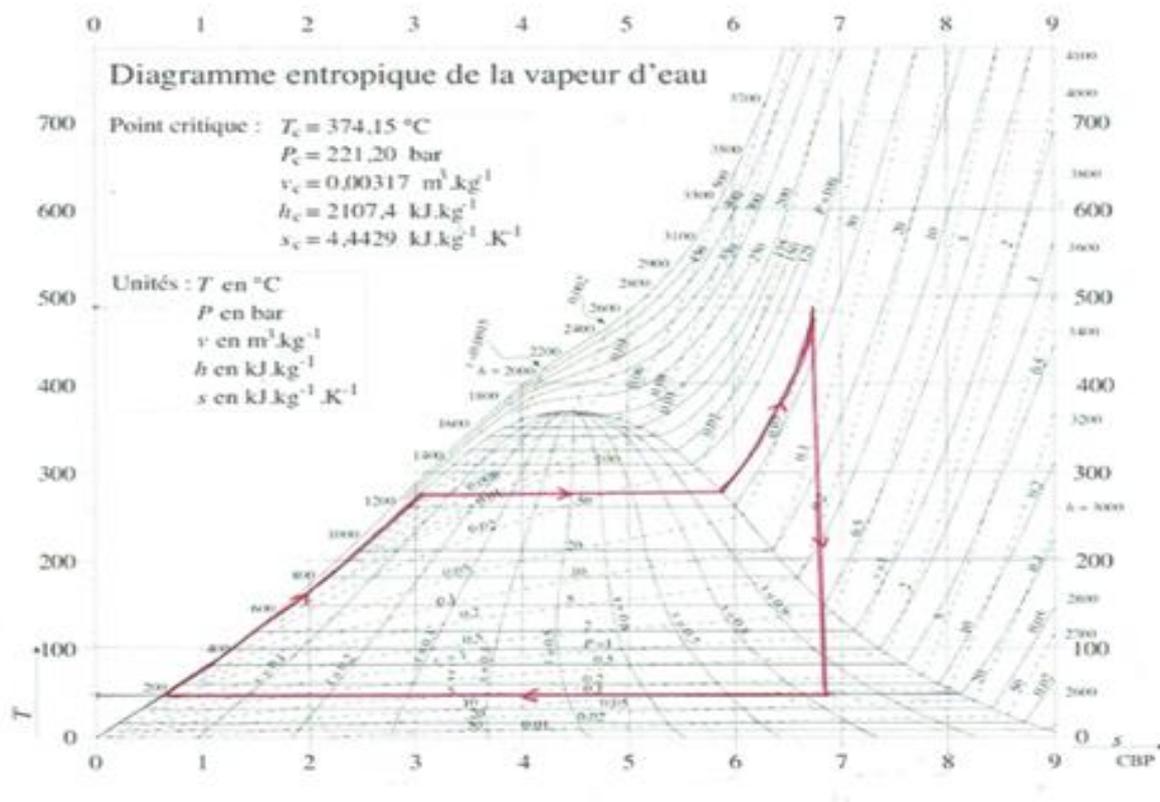


Fig.3.8 diagramme entropique de la vapeur d'eau (date 2)

* Détermination de la caractéristique inconnue :

On procède avec la même démarche suivie pour la première date dans la détermination des caractéristiques inconnues (La fonction entropie S). Les valeurs des entropies sont déduites à l'aide du diagramme (T-S) et elles sont regroupées dans le Tableau 3.4.

III.4.2.3- Bilan exergetique de la turbine à vapeur

Le bilan exergetique s'exprime par :

$$\dot{E}_w^+ - \dot{E}^- = \dot{L} \rightarrow \dot{E}^- = \dot{E}_w^+ - \dot{L} \quad (3.35)$$

- **Calcul des termes de l'équation (3.35):**

- La copuissance transformation reçue par le système au niveau de la vapeur

$$\dot{E}_w^+ = \sum [k_j \dot{m}_j].$$

$$\dot{E}_w^+ = \frac{1000}{3600} (\dot{m}_4 \times K_4) - (\dot{m}_{10} \times K_{10} + \dot{m}_{11} \times K_{11} + \dot{m}_{4'} \times K_{4'})$$

$$K_4 = h_4 - Ta.S_4 \rightarrow K_4 = 3380,422 - 20(6,75) \rightarrow K_4 = 3244,422 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_{10} = h_{10} - Ta.S_{10} \rightarrow K_{10} = 2417,098 - 20(6,356) \rightarrow K_{10} = 2289,978 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_{11} = h_{11} - Ta.S_{11} \rightarrow K_{11} = 2417,102 - 20(6,92) \rightarrow K_{11} = 2278,702 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_{4'} = h_{4'} - Ta.S_{4'} \rightarrow K_{4'} = 2150,692 - 20(6,88) \rightarrow K_{4'} = 2013,092 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$\dot{E}_w^+ = \frac{1000}{3600} (280 \times 3244,422) - (19,2 \times 2289,978 + 15,7 \times 2278,702 + 2013,092 \times 245,1)$$

$$\dot{E}_w^+ = 93212,5866 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw].$$

- La copuissance transformation donnée par le système au niveau de la vapeur

$$\dot{E}^- = \sum [h_j \dot{m}_j].$$

$$\dot{E}^- = \frac{1000}{3600} (h_4 \times \dot{m}_4) - (h_{10} \times \dot{m}_{10} + h_{11} \times \dot{m}_{11} + h_{4'} \times \dot{m}_{4'})$$

$$\dot{E}^- = \frac{1000}{3600} (280 \times 3380,422) - (19,2 \times 2417,098 + 15,7 \times 2417,102 + 2150,692 \times 245,1)$$

$$\dot{E}^- = 93062,99106 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw].$$

III.4.2.3.a- La perte exergetique dans la turbine :

$$\dot{L} = \dot{E}_w^+ - \dot{E}^-$$

$$\dot{L} = 93212,58666 - 93062,99106$$

$$\dot{L} = 149,5956 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw].$$

III.4.2.3.b- Le rendement exergetique dans la turbine :

$$\eta = 1 - \frac{\dot{L}}{\dot{E}_w^+}$$

$$\eta = 1 - \frac{149,5956}{93212,58666} = 99,83\%$$

III.4.2.4- Bilan exergetique d'un Réchauffeur 2 :

Le bilan exergetique s'exprime par :

$$\dot{E}_w^+ - \dot{L} = 0 \rightarrow \dot{E}_w^+ = \dot{L} \quad (3.36)$$

$$\text{D'où :} \quad \dot{E}_w^+ = \dot{E}_{wa}^+ + \dot{E}_{w\beta}^-$$

$$\text{Donc :} \quad \dot{E}_{w\beta}^- = \dot{E}_{wa}^+ - \dot{L}$$

- Calcul des termes de l'équation (3.36):

- La copuissance transformation donnée par le système au niveau du débit masse \dot{m}_{11} .

$$\dot{E}_{wa}^+ = \sum [k_j \dot{m}_j].$$

$$\dot{E}_{wa}^+ = \frac{1000}{3600} \dot{m}_{11} (k_{11} - k_{11'}).$$

$$K_{11} = h_{11} - T_a.S_{11} \rightarrow K_{11} = 2417,102 - 20(6,90) \rightarrow K_{11} = 2279,102 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_{11'} = h_{11'} - T_a.S_{11'} \rightarrow K_{11'} = 359,80 - 20(1) \rightarrow K_{11'} = 339,8 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$\dot{E}_{wa}^+ = \frac{1000}{3600} (\dot{m}_{11})(k_{11} - k_{11'}).$$

$$\dot{E}_{wa}^+ = \frac{1000}{3600} (15,7)(2279,102 - 339,9).$$

$$\dot{E}_{wa}^+ = 8457,5115 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw].$$

- La copuissance transformation reçue par le système au niveau du débit masse \dot{m}_a .

$$\dot{E}_{w\beta}^- = \sum [k_j \dot{m}_j].$$

$$K_a = h_a - T_a.S_a \rightarrow K_a = 232,2 - 20(0,84) \rightarrow K_a = 306,4 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_6 = h_6 - T_a.S_6 \rightarrow K_6 = 231 - 20(0,76) \rightarrow K_6 = 215,8 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$\dot{E}_{w\beta}^- = \frac{1000}{3600} (\dot{m}_a) (k_a - k_6).$$

$$\dot{E}_{w\beta}^- = \frac{1000}{3600} (245,1)(306,4 - 215,8).$$

$$\dot{E}_{w\beta}^- = 6168,35 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw].$$

III.4.2.4.a- La perte exergetique dans le Réchauffeur 2 :

$$\dot{L} = \dot{E}_{wa}^+ - \dot{E}_{w\beta}^-$$

$$\dot{L} = 8457,5115 - 6168,35$$

$$\dot{L} = 2289,1615 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw].$$

III.4.2.4.b- Le rendement exergetique du Réchauffeur 2 :

$$\eta = 1 - \frac{\dot{L}}{\dot{E}_{wa}^+}$$

$$\eta = 1 - \frac{2289,1615}{8457,5115} = 72,93\%.$$

III.4.2.5- Bilan exergetique d'un Réchauffeur 1 :

Le bilan exergetique s'exprime par :

$$\dot{E}_w^+ - \dot{L} = 0 \rightarrow \dot{E}_w^+ = \dot{L} \quad (3.37)$$

$$D'où : \quad \dot{E}_w^+ = \dot{E}_{wa}^+ + \dot{E}_{w\beta}^-$$

$$Donc : \quad \dot{E}_{w\beta}^- = \dot{E}_{wa}^+ - \dot{L}$$

- Calcul des termes de l'équation (3.37):

- La copuissance transformation donnée par le système au niveau du débit masse \dot{m}_{10} .

$$\dot{E}_{wa}^+ = \sum [k_j \dot{m}_j].$$

$$\dot{E}_{wa}^+ = \frac{1000}{3600} \dot{m}_{10} (k_{10} - k_{10}').$$

$$K_{10} = h_{10} - T_a.S_{10} \rightarrow K_{10} = 2417,098 - 20(6,356) \rightarrow K_{10} = 2265,902 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_{10}' = h_{10}' - T_a.S_{10}' \rightarrow K_{10}' = 544,829 - 20(1,52) \rightarrow K_{10}' = 513,89 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$\dot{E}_{wa}^+ = \frac{1000}{3600} (19,2)(2265,902 - 513,89).$$

$$\dot{E}_{wa}^+ = 9344,064 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

- La copuissance transformation reçue par le système au niveau du débit masse \dot{m}_c .

$$\dot{E}_{w\beta}^- = \sum [k_j \dot{m}_j].$$

$$\dot{E}_{w\beta}^- = \frac{1000}{3600} (\dot{m}_c) (k_c - k_b).$$

$$K_c = h_c - T_a.S_c \rightarrow K_c = 483,3 - 20(1,48) \rightarrow K_c = 453,7 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_b = h_b - T_a.S_b \rightarrow K_b = 347,5 - 20(0,88) \rightarrow K_b = 329,9 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$\dot{E}_{w\beta}^- = \frac{1000}{3600} (260,8) (453,7 - 329,9).$$

$$\dot{E}_{w\beta}^- = 8968,84444 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

III.4.2.5.a- La perte exergetique dans le Réchauffeur 1 :

$$\dot{L} = \dot{E}_{wa}^+ - \dot{E}_{w\beta}^-$$

$$\dot{L} = 9344,064 - 8968,622222$$

$$\dot{L} = 375,44 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

III.4.2.5.b- Le rendement exergetique est du Réchauffeur 1 :

$$\eta = 1 - \frac{\dot{L}}{\dot{E}_{wa}^+}$$

$$\eta = 1 - \frac{375,44}{9344,064} = 95,98\%.$$

III.4.2.6- Bilan exergetique de la chaudière :

Le bilan exergetique s'exprime par :

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{E}_{w0}^+ + \dot{E}_p^+ + \dot{L} \rightarrow \dot{L} = \dot{E}_{w0}^+ + \dot{E}_p^+ - \dot{E}_{we}^- \quad (3.38)$$

- Calcul des termes de l'équation (3.38):

- La copuissance transformation du réseau d'eau.

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_e (k_2 - k_1)$$

$$K_2 = h_2 - T_a.S_2 \rightarrow K_2 = 3380,422 - 20(6,76) \rightarrow K_2 = 3245,222 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_1 = h_1 - T_a.S_1 \rightarrow K_1 = 552,238 - 20(1,64) \rightarrow K_1 = 519,438 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$\dot{E}_{we}^- = \frac{1000}{3600} (310)(3245,222 - 519,438).$$

$$\dot{E}_{we}^- = 234720,1167 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw].$$

$$\dot{E}_{w0}^+ = \Delta k_0 = \dot{m}_B \Delta k_0$$

$$\dot{E}_{w0}^+ = \frac{\dot{m}_v}{V_m} \Delta k_0$$

$$\dot{m}_v = 39220 \left[\frac{m^3}{h} \right].$$

$$V_m = 22414 \left[\frac{m^3}{Kmol} \right].$$

$$\Delta k_0 = x_{CH_4} \Delta k_{CH_4} + x_{C_2H_6} \Delta k_{C_2H_6} + x_{C_3H_8} \Delta k_{C_3H_8} + x_{C_4H_{10}} \Delta k_{C_4H_{10}} + x_{C_5H_{12}} \Delta k_{C_5H_{12}}.$$

$$\Delta k_0 = (0,8350 \times 829800) + (0,0690 \times 149200) + (0,021 \times 24800) + (0,0088 \times 280120) + (0,0023 \times 3454100).$$

$$\Delta k_0 = 873616,79 \left[\frac{KJ}{Kmol} \right]$$

$$\dot{E}_{w0}^+ = \frac{1}{3600} \left(\frac{392200}{22414} * 873616,79 \right)$$

$$\dot{E}_{w0}^+ = 424626,108 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

III.4.2.6.a- La perte exergetique dans la Chaudière :

$$\dot{L} = \dot{E}_{w0}^+ + \dot{E}_p^+ - \dot{E}_{we}^-$$

$$\dot{E}_p^+ = 500 [Kw]$$

$$\dot{L} = (424626,108 + 500) - 234720,1167$$

$$\dot{L} = 190405,9913 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

III.4.2.6.b- Le rendement exergetique de la Chaudière :

$$\eta = \frac{190405,9913}{424626,108 + 500} = 44,78\%$$

III.4.2.7- Bilan exergetique du condenseur :

Le bilan exergetique s'exprime par :

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{E}_{wv}^+ - \dot{L} \rightarrow \dot{L} = \dot{E}_{wv}^+ - \dot{E}_{we}^- \quad (3.39)$$

- **Calcul des termes de l'équation (3.39):**

- La copuissance transformation reçue par le condenseur au niveau du circuit vapeur.

$$\dot{E}_{wv}^+ = \dot{m}_{4'} (k_5 - k_{4'})$$

$$K_{4'} = h_{4'} - T_a.S_{4'} \rightarrow K_{4'} = 2150,692 - 20(6,88) \rightarrow K_{4'} = 2013,092 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_5 = h_5 - T_a.S_5 \rightarrow K_5 = 191,420 - 20(0,48) \rightarrow K_5 = 181,82 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$\dot{E}_{wv}^+ = \frac{1000}{3600} (245,1)(2013,092 - 181,82).$$

$$\dot{E}_{wv}^+ = 124679,1020 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

- La copuissance transformation donnée par le condenseur au niveau du circuit eau.

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_{30} (k_{31} - k_{30}).$$

$$- K_{31} = h_{31} - T_a.S_{31} \rightarrow K_{31} = 94,90 - 20(0,3334) \rightarrow K_{31} = 88,232 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$- K_{30} = h_{30} - T_a.S_{30} \rightarrow K_{30} = 69,42 - 20(0,2462) \rightarrow K_{30} = 64,492 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$\dot{E}_{we}^- = \frac{1000}{3600} (3360)(88,232 - 64,492).$$

$$\dot{E}_{we}^- = 79766,4 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

III.4.2.7.a- La perte exergetique dans le Condenseur:

$$\dot{L} = \dot{E}_{wv}^+ - \dot{E}_{we}^-.$$

$$\dot{L} = 124679,1020 - 79766,4$$

$$\dot{L} = 44912,720 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

III.4.2.7.b- Le rendement exergetique du Condenseur:

$$\eta = 1 - \frac{\dot{L}}{\dot{E}_{wv}^+}$$

$$\eta = 1 - \frac{44912,720}{124679,1020} = 63,97 \%$$

III.4.2.8- Bilan exergetique de la Pompe d'extraction :

- La copuissance transformation reçu par la pompe d'extraction au niveau du circuit eau

$$\dot{E}_{wv}^+ = \dot{m}_5 (k_6 - k_5) .$$

$$k_5 = h_5 - Ta.S_5 \rightarrow K_5 = 191,420 - 20(0,48) \rightarrow K_5 = 181,82 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_6 = h_6 - Ta.S_6 \rightarrow K_6 = 231 - 20(0,76) \rightarrow K_6 = 215,8 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$\dot{E}_w^+ = \frac{1000}{3600} (245,1)(215,8 - 181,82).$$

$$\dot{E}_w^+ = 2313,47 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

III.4.2.9- Bilan exergetique de la Pompe alimentaire :

- La copuissance transformation reçue par la pompe alimentaire au niveau du circuit eau

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_1 (k_1 - k_9) .$$

$$K_1 = h_1 - Ta.S_1 \rightarrow K_1 = 552,238 - 20(1,64) \rightarrow K_1 = 519,438 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$K_9 = h_9 - Ta.S_9 \rightarrow K_9 = 552,23 - 20(1,64) \rightarrow K_9 = 519,43 \left[\frac{KJ}{Kg} \right].$$

$$\dot{E}_w^+ = \frac{1000}{3600} (310)(519,438 - 519,43).$$

$$\dot{E}_w^+ = 0,6888 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

III.4.2.10- La perte totale \dot{L}_t :

La perte exergetique totale est donnée par la formule (3.21). Le calcul donne :

$$\dot{L}_t = 44912,702 + 149,5956 + 2289,1615 + 375,44 + 190405,9913$$

$$\dot{L}_t = 238132,8904 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw].$$

III.4.2.10.a- Contribution de la perte au niveau du condenseur :

En utilisant la formule (3.22), on trouve :

$$\frac{44912.702}{238132,8904} = 0,1887 \rightarrow 18.874 \%$$

III.4.2.10.b- Contribution de la perte au niveau de la turbine:

En utilisant la formule (3.23), on trouve :

$$\frac{149,5956}{238132,8904} = 0,0006 \rightarrow 0.062 \%$$

III.4.2.10.c- Contribution de la perte au niveau du réchauffeur (2) :

En utilisant la formule (3.24), on trouve :

$$\frac{2289,1615}{238132,8904} = 0,00918 \rightarrow 0.918 \%$$

III.4.2.10.d- Contribution de la perte au niveau du réchauffeur (1) :

En utilisant la formule (3.25), on trouve :

$$\frac{375,44}{238132,8904} = 0,0015 \rightarrow 0.157 \%$$

III.4.2.10. e – Contribution de la perte au niveau de la chaudière :

En utilisant la formule (3.26), on trouve :

$$\frac{190405.9913}{238132,8904} = 0,7975 \rightarrow 79.965 \%$$

III.4.2.11- Le rendement exergetique total de la centrale thermique étudiée:

En utilisant la formule du rendement exergetique total :

$$\eta = 1 - \frac{\dot{L}_t}{\dot{E}_p^+ + \dot{E}_{w0}^+}$$

Il vient :

$$\eta = 1 - \frac{238132,8904}{424626,108 + 500} = 0,4385 \rightarrow 43,85 \%$$

$\eta = 43,85 \%$

III.4.2.12- Le rendement énergétique total de la centrale thermique étudiée:

En utilisant la formule du rendement exergetique total :

$$\eta = 1 - \frac{\dot{E}_f^-}{\dot{E}_p^+ + \dot{Q}_C} \quad (3.40)$$

- **Calcul des termes de l'équation (3.40) :**

- Calcul du pouvoir énergétique \dot{Q}_C .

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_B \Delta h_{0i}$$

Δh_{0i} est le pouvoir énergétique du combustible B, référé à P_0 et T_0 .

$$\Delta h_{0i} = (x_{CH_4})^2 \Delta k_{CH_4} + (x_{C_2H_6})^2 \Delta k_{C_2H_6} + (x_{C_3H_8})^2 \Delta k_{C_3H_8} + (x_{C_4H_{10}})^2 \Delta k_{C_4H_{10}} + (x_{C_5H_{12}})^2 \Delta k_{C_5H_{12}}$$

$$\Delta h_{0i} = (0,83)^2 \times 802300 + (0,0690)^2 \times 1427800 + (0,021)^2 \times 2044000 + (0,0088)^2 \times 265700 + (0,0023)^2 \times 3242100.$$

$$\Delta h_{0i} = 560542,8933 \left[\frac{KJ}{Kmol} \right].$$

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_B \Delta h_{0i}.$$

$$\dot{Q}_C = 0.486 \times 560542,8933.$$

$$\dot{Q}_C = 272423,8461 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

- la puissance transformation donnée par la turbine.

$$\dot{E}_f^- = 93062,99106 \left[\frac{KJ}{s} \right] = [Kw]$$

Finalement, le rendement énergétique est :

$$\eta = 1 - \frac{93062,99106}{272423,8461 + 500} = 0,6590 \rightarrow 65,90 \%$$

III.4.3. 1-Tableaux récapitulatifs des calculs :

élément	Paramètre physique	Valeur en KW	Perte exergetique en KW	η_{exe}
<u>Turbine</u>	*Copuissance Reçue	91154,43639	124,7233389	99,86%
	*puissance donnée	91029,71306		
<u>Réchauffeur 2</u>	*Copuissance Reçue	6349,048	2106,841167	75,08%
	*Copuissance donnée	8455,019440		
<u>Réchauffeur 1</u>	*Copuissance Reçue	9224,1944	244,0402667	92,25%
	*Copuissance donnée	9468,234667		
Chaudière	*Copuissance Reçue	425126,108	201444,83022	52,61%
	*Copuissance donnée	223681,12777		
<u>Condenseur</u>	*Copuissance Reçue	112763,616	32997,216	70,73%.
	*Copuissance donnée	79766.4		

Tableau 3.5 Récapitulatif de calcul pour la première date

élément	Paramètre physique	Valeur en KW	Perte exergetique en KW	η_{exe}
<u>Turbine</u>	*Copuissance Reçue	93212,5866	149,5956	99,83%
	*puissance donnée	93062,99106		
<u>Réchauffeur 2</u>	*Copuissance Reçue	6168,35	2289,1615	72,93%.
	*Copuissance donnée	8457,5115		
<u>Réchauffeur 1</u>	*Copuissance Reçue	8968,84444	375,44	95,98%
	*Copuissance donnée	9344,064		
<u>Chaudière</u>	*Copuissance Reçue	425126,108	190405,9913	44,78%
	*Copuissance donnée	234720,1167		
<u>Condenseur</u>	*Copuissance Reçue	124679,1020	44912,720	63,97%.
	*Copuissance donnée	79766.4		

Tableau 3.6 Récapitulatif de calcul pour la deuxième date

Les Tableaux 3.5 et 3.6 donnent un récapitulatif de tous les paramètres de la centrale thermique calculés par l'analyse exergetique. Les récapitulatifs sont donnés pour les deux dates choisies.

Les résultats de calcul effectués sur la centrale étudié sont donnés par les tableaux 3.2 et 3.3 avec des données de deux dates distantes d'une semaine.

Tableau 3.2 : pour la première date.

Tableau 3.3 : pour la deuxième date.

III.4.4- Interprétation des résultats :

- D'après les résultats de l'analyse exergetique effectuée sur une centrale thermique à vapeur, on constate que les pertes exergetiques dans la chaudière présentent presque la totalité des pertes produites au niveau de la centrale. Ces pertes sont principalement causées par les réactions chimiques, l'énergie transférée à l'atmosphère par les produits de combustion (fumées,.....) et au transfert de chaleur avec chute de température.

On constate également que les pertes exergetiques au niveau du réchauffeur R_1 sont nettement supérieures à celles produites au niveau du réchauffeur R_2 . En effet, les pertes exergetiques provoquées par la dissipation sont élevées lorsque elles se produisent à de basses températures. La perte s'exprime généralement par :

$$L_r = \int \frac{T_a}{T} \delta R.$$

quand : $T \rightarrow 0 \implies$ pertes $L_r \rightarrow \infty$.

quand : $T \rightarrow \infty \implies$ pertes $L_r \rightarrow 0$.

- Le rendement exergetique dans la turbine est inférieur à l'unité ($\eta_{exe} < 1$). Ceci est du à la dissipation dans le circuit eau-vapeur.

- Le rendement énergétique de l'installation est peu élevé comparé au rendement exergetique.

Ceci s'explique du fait que l'approche exergetique quantifie correctement les pertes causées par les irréversibilités au niveau de l'installation étudié. En conséquence, le rendement exergetique est faible comparé au rendement énergétique. Le rendement exergetique représente en effet le rendement réel de l'installation.

- La comparaison des performances (rendements exergetique et énergétique) de la centrale, en

utilisant les données des dates choisies, montre que les rendements ont chutés légèrement. Ceci s'explique par la chute des caractéristiques thermodynamiques (c.-à-d. chute de l'énergie) dans le circuit eau-vapeur au cours du fonctionnement de la centrale.

Conclusion :

Dns ce chapitre, nous nous sommes familiarisés, dans un premier temps, avec la méthode exergetique. Par la suite, l'application de cette méthode sur une centrale thermique à vapeur est réalisée avec succès. En effet, on a pu évaluer les pertes exergetiques, ainsi que le rendement exergetique global pour deux dates différentes.

Conclusion Générale

Ce modeste travail concerne l'étude exergetique d'une centrale thermique de production d'énergie de l'unité 10 GL1/K au niveau de l'entreprise Sonatrach-Skikda. Les centrales énergétiques sont parmi les moyens industriels les plus efficaces pour le développement de tout pays.

Dans cette étude, on a essayé d'évaluer la qualité thermodynamique de l'installation étudiée par le calcul des pertes exergetiques au niveau de chaque organe de la centrale thermique, ainsi que le rendement exergetique global.

L'analyse exergetique est un outil de travail extrêmement pratique permettant la mise en évidence de la qualité thermodynamique de tout système quelque soit sa nature (élément, appareil, machine, installation,etc.). Elle permet donc de donner un véritable «diagnostic» concernant l'état thermodynamique du système étudié, en décelant toutes les imperfections correspondant à l'enchaînement suivant:

irréversibilité → création d'entropie → dégradation de l'énergie → perte

L'analyse exergetique est très utile du fait qu'elle met, d'une part, l'accent sur les défauts thermodynamiques d'un système et évalue, d'autre part, correctement les pertes thermodynamiques de tout équipement énergétique. Les pertes ont un lien direct avec les irréversibilités dans les transformations thermodynamiques du système. Les praticiens cherchent à réaliser des opérations aussi peu irréversibles que possible, cela en commençant par éliminer les irréversibilités les plus criardes.

L'étude de la centrale thermique choisie, nous a permis d'appliquer l'approche exergetique avec succès et de démontrer son importance. En effet, on a pu évaluer les pertes thermodynamiques pour chaque organe et d'en calculer le rendement exergetique global de l'installation thermique à vapeur étudiée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Besson Armand (2008). Présentation cours 1ere STI GEL (2007-2008) : "LE FONCTIONNEMENT DES CENTRALES NUCLEAIRES".
- [2] Ian Graham (2000), "Les énergies en questions, l'énergie hydraulique", Bonneuil-les-Eaux [France] : Gamma ; Montréal : École active, c2000, 48p.
- [3] "L'énergie de A à Z ". [En ligne]
http://www.edf.com/html/panorama/transversal/media_eol/eol_anim_01.html. [Page consulté le 10mai 2017]
- [4] "L'énergie solaire". [Document électronique].
https://www.eleves.ens.fr/home/gouzien/Publications/Secondaire/Elie_Gouzien_TPE.pdf.
- [5] Zouglami A, Daghboudj S, "Etude numérique du vrillage des aubes d'une turbine à vapeur axiale", Mémoire Master, Université Larbi Tébessi, Tébessa, 2011.
- [6] Kali s, Dr. KHADIR Med T, "Construction d'une ontologie à partir de bases de données pour l'aide à la maintenance industrielle application turbine à vapeur", Mémoire Ingénieur, Université 20 out 1955, Skikda, 2008.
- [7] Lucien vivier, "Turbines à vapeur et à gaz: théorie, construction, utilisation ", Edition Albin Michel, 1965, p 446.
- [8] Daghboudj S, Gahmousse A, Harkati L, "Etude des fréquences propres d'une poutre encastree-libre cas d'une section constante (application aux aubes des turbines à vapeur et validation des résultats avec ABAQUS) ", Communication Université Labri Tébessi, Tébessa.
- [9] "Chaudière ". Dans Wikipedia, l'encyclopédie libre. [En ligne].
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Chaudière>. [Consulté le 20mai 2017].
- [10] William Lévy (1990). "Condenseurs par surface dans les centrales thermiques". [En ligne].
<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-thermique-industrielle-tiabec/archive-1/condenseurs-par-surface-dans-les-centrales-thermiques-b1540/>. [Consulté le 25mai 2017]
- [11] "Condenseur (séparation)". Dans Wikipedia, l'encyclopédie libre. [En ligne].
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Condenseur_\(séparation\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Condenseur_(séparation)). [Consulté le 27mai 2017].
- [12] Cours de thermodynamique appliquée, ESP, DIC2 , 2000.
- [13] Lucien Borel, Daniel Favrat, "Thermodynamique et énergétique, Tome 1 de l'exergie à l'énergie", 2005 édition, entièrement revue et augmentée presses polytechniques et universitaires romandes.
- [14] "Fonctionnement de l'énergie thermique". [En ligne]. <http://energiedemain.e-monsite.com/pages/alternatives-au-nucleaire/fonctionnement-de-l-energie-thermique.html#ltuBjBb0Km5cBeWO.99>. [Consulté le 01 juin 2017]
- [15] Omar Benayache et Yacine Boudebza "Evolution des performances d'une centrale à vapeur de l'unité 10 GL1/K", mémoire de fin d'études, université de Skikda, 2009, Dirigé par Dr. SARI Mohamed Rafik.

Liste des Figures

- **Fig. 1.1** Schéma d'une centrale nucléaire.....P07
- **Fig.1.2** Schéma d'une centrale hydraulique.P09
- **Fig.1.3** quelque organe d'une centrale hydraulique.....P10
- **Fig.1.4** les différents éléments d'une éolienne.....P11
- **Fig.1.5** Schéma d'une centrale thermique.....P15
- **Fig.1.6** Schéma de turbine à vapeur (Parsons).P17
- **Fig.1.7** Principe de fonctionnement d'une turbine à vapeur.P18
- **Fig.1.8** Chaudière industrielle.....P19
- **Fig.2.1** Système thermodynamique quelconque.P23
- **Fig.2.2** Système thermodynamique comportant deux réseaux.P25
- **Fig.2.3** Système thermodynamique quelconque.P28
- **Fig.2.4** Variation du rapport T_a / T et de la perte exergétique L_r en fonction de la température T , avec en paramètre la température T_a de l'atmosphère..... P34
- **Fig.3.1** Schéma d'une turbine à vapeur.P39
- **Fig.3.2** Schéma d'un réchauffeur à surface.P41
- **Fig.3.3** Schéma d'un condenseur.P43
- **Fig.3.4** Schéma d'une chaudière industrielle.P44
- **Fig.3.5** Schéma de principe de la centrale thermique étudiée P47
- **Fig.3.7** diagramme entropique de la vapeur d'eau (date1).P50
- **Fig.3.8** diagramme entropique de la vapeur d'eau (date 2).P60

Liste des tableau

- **Tableau 3.1** La composition volumique d'un gaz naturel.P47
- **Tableau.3.2** Propriété thermodynamique (date1).P49
- **Tableau.3.3** Propriété thermodynamique (date 2).P60
- **Tableau 3.5** Récapitulatif de calcul pour la première date.....P70
- **Tableau 3.6** Récapitulatif de calcul pour la deuxième date.....P70