

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار –
عنابنة

Faculté : Technologie
Département : Génie mécanique
Domaine : Sciences et techniques
Filière : Génie mécanique
Spécialité : Energétique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème :

**Analyse exergetique du circuit eau-vapeur d'une centrale
thermique**

Présenté par : *AOUADI HADIL*

Encadrant : Pr. *SARI MOHAMED RAFIK*

Université Badji Mokhtar Annaba

Jury de Soutenance :

MECHIGHEL FARID	Professeur	Université	Président
SARI MOHAMED RAFIK	Professeur	Université	Encadrant
KHADRI YOUCEF	Professeur	Université	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements :

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude envers notre Dieu qui nous a guidés sur le bon chemin et nous a aidés à le suivre.

Je tiens à remercier chaleureusement Monsieur "**Sari Mohamed Rafik**", notre promoteur, pour avoir proposé le sujet et pour ses conseils inestimables, son soutien constant et sa confiance en notre travail.

Nous exprimons notre gratitude la plus sincère envers les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant d'évaluer notre travail.

Mes enseignants en énergétique à l'Université de BADJI MOKHTAR méritent également toute ma reconnaissance pour leur transmission de connaissances, leur disponibilité et leur amabilité tout au long de notre parcours universitaire.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à mes parents pour les sacrifices qu'ils ont faits pour mon bien-être et la réalisation de mes aspirations. C'est grâce à eux que nous sommes devenus ce que nous sommes aujourd'hui.

Enfin, je suis profondément reconnaissant envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail particulièrement, à ma chère mère qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui s'est toujours efforcée de me voir heureuse, et mon père que j'adore, pour le goût de l'effort qu'il a suscité en moi, à cause de sa rigueur. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.

A ma grand-mère ceci est ma profonde gratitude pour votre amour éternel, que ce rapport soit le meilleur cadeau que je puisse vous offrir. Que Dieu te garde pour moi

A mes frères qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.

A mon adorable petite sœur qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.

Pour tous les membres de la famille qui m'ont donné tout l'amour et la vivacité.

A tous mes chers amis et tous les étudiants de l'université de Badji Mokhtar.

Je leur souhaite beaucoup de succès, de progrès et de bonheur dans la vie.

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

Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

AOUADI HADIL

NOMENCLATURE

Nomenclature

S : Entropie du système.	KJ /Kg. K.
S_j : Entropie massique du fluide au droit de la section J.	KJ /Kg. K.
\dot{S}^i : Entropie due aux opérations internes irréversibles, c'est-à-dire simplement aux irréversibilités du système. Elle caractérise la création d'entropie.	KJ /Kg. K.
T : Température de la source.	C° .
T_0 : Température de référence.	C° .
T_a : Température ambiante.	C° .
P_0 : Pression de référence.	bar.
P_a : Pression atmosphérique.	bar.
\dot{M}_j^+ : Débit-masse reçu par le système, en une section J, d'un système externe J.	Kg /s.
I : L'irréversibilité.	KJ.
U_{eCZ} : Energie effective totale.	J/Kg.
W_{env} : Travail envisagé.	KJ.
$W_{rév}$: Travail réversible.	KJ.
W_U : Travail utile.	KJ.
U_e : Energie effective.	J/Kg.
U_{eCZ} : Energie effective totale.	J/Kg.
\dot{E}^- : Puissance-travail donnée par le système.	KW.
\dot{E}_{eK}^+ : la puissance-travail effective fournie système.	KW.
\dot{E}_k^+ : puissance-travail reçue par le système, d'un système k, autre que l'atmosphère.	KW.
E_q^+ : cotravail-chaleur reçue.	J.
E_q^+ : copuissance-chaleur reçue.	W.
\dot{Y}_n^+ : l'énergie-transformation reçue au niveau du réseau n.	J/Kg.

E_y^+ : cotravail– transformation reçue.	J.
E_y^+ : copuissance- transformation reçue.	KW.
\dot{E}_w^+ : La copuissance transformation reçue par le système.	KW.
\dot{E}_{we}^- : La copuissance transformation du réseau d'eau principal.	KW.
\dot{E}_{w0}^+ : Le pouvoir exergetique exprimé en puissance.	KW.
\dot{E}_{wv}^+ : La copuissance transformation reçu par le condenseur au niveau du circuit vapeur.	KW.
K : Coenthalpie total massique.	
K_{cz} : coenthalpie totale.	J
K_{cz} : coenthalpie totale massique.	J/Kg.
J_{cz} : coénergie totale.	J.
j_{cz} : coénergie totale massique.	J/Kg.
h_{czj} : Enthalpie totale massique du fluide au droit de la section j.	J/Kg.
L : perte exergetique en énergie.	J.
\dot{L} : Perte exergetique en puissance.	KW.
\dot{L}_t : La perte exergetique totale de trois corps dans la turbine.	KW.
\dot{L}_{totale} : La perte exergetique totale de la centrale.	KW.
\dot{m}_e : est le débit l'eau introduit dans la chaudière.	Kg /s.
h_j : enthalpie total massique du fluide au point j.	KJ/Kg.
P_a : Pression atmospherique.	bar.
\dot{Q}_e^- : Puissance-chaaleur reçue par le système.	KW.
\dot{Q}_a^+ : Puissance-chaaleur reçue par le système, de l'atmosphère.	KW.

\dot{Q}_i^+ : puissance-chaleur reçue par le système, d'un système i, autre que l'atmosphère.	KW.
\dot{E}_p^+ : Puissance électrique des moteurs de la pompe à combustible et des ventilateurs.	KW.
ΔK_0 : Le pouvoir exergétique du combustible B.	KJ/ K mol.
\dot{m}_v : Débit volumique.	m ³ /h.
\dot{m}_v : Debit molaire.	K mol / s.
\dot{E}_{pe}^+ : Puissance des moteurs électriques.	K W.
\dot{L}_c : La perte exergétique dans la chaudière.	K W.
Symboles grecques	
Θ : facteur de Carnot.	
η : rendement exergétique.	

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Liste des Figures :

Figure 1 : Fonctionnement d'une centrale nucléaire.

Figure 2 : un reacteur .

Figure 3 : un générateur.

Figure 4 : Une centrale hydroélectrique.

Figure 5 : Fonctionnement d'une centrale hydraulique.

Figure 6 : TURBINE.

Figure 7 : ROTOR.

Figure 8 : SALLE DES GENERATEURS.

Figure 9 : Roue PELTON.

Figure 10 : Turbine PELTON.

Figure 11 : Centrale hydraulique de moyenne chute.

Figure 12 : Turbine FRANCIS.

Figure 13 : Disposition d'une centrale de Basse chute (au fil d'eau).

Figure 14 : Turbine KAPLAN.

Figure 15 : la centrale solaire.

Figure 16 : une centrale éolienne.

Figure 17 : les différents éléments d'une éolienne.

Figure 18 : Centrale thermique.

Figure 19 : principe de fonctionnement d'une centrale thermique.

Figure 20 : schéma d'une chaudière.

Figure : 21 turbine à un seul corps.

Figure 22 : Turbine à plusieurs corps.

Figure 23 : schéma d'un condenseur.

Figure 24 : Un système en équilibre avec son milieu extérieur est au point mort

Figure 25 : Le milieu extérieur immédiat.

Figure 26 : Mesure qu'un système ferme se détend, du travail est fait pour déplacer l'air atmosphérique qui se trouve au voisinage (W_{env}).

Figure 27 : Dans les systèmes dont le volume demeure constant au cours de l'évolution, le travail réel et le travail utile sont équivalents ($W = W_u$).

Figure 28 : La différence entre le travail réversible et le travail utile est l'irréversibilité.

Figure 29 : Système thermodynamique quelconque.

Figure :30 Système thermodynamique quelconque.

Figure 31 : Schéma d'un condenseur.

Figure 32 : Schéma d'une turbine à vapeur.

Figure 33 : Schéma d'une chaudière industrielle.

Figure 34 : Schéma de la centrale thermique à vapeur.

Liste des tableaux :

Tableau 1 : La composition volumique du gaz naturel.

Tableau 2 : Propriétés thermodynamiques.

Tableau 3 : Récapitulatifs des calculs.

Résumé

De nos jours, il est communément admis que la demande en énergie est considérable, tandis que les coûts de production sont élevés, ce qui implique une compréhension approfondie des méthodes de production. Les centrales thermiques à vapeur sont largement utilisées pour répondre à cette demande.

Il est également largement reconnu que les centrales énergétiques impliquent de multiples transformations et transferts thermodynamiques, qui peuvent entraîner des pertes thermiques. Ainsi, la question se pose de savoir comment réduire au minimum ces pertes.

Dans ce document, nous envisageons d'effectuer une évaluation énergétique d'une installation thermique à vapeur. L'objectif principal est de fournir un véritable examen de l'état thermodynamique de la centrale étudiée. Nous examinons les pertes énergétiques et discutons du rendement global de la centrale.

Mots Clés : Centrale thermique - Approche énergétique - Approche exergetique - Pertes – Rendement.

Sommaire :

Nomenclature

Introduction générale.....1

Chapitre I

Généralité sur les centrales thermiques de la production d'électricité.

I 1 Introduction.....2

I 2 Généralités.....2

I 2 1 Les Centrales Nucléaires.....2

I 2. 1 .1 Histoire.....2

I 2. 1 .2 Le combustible nucléaire l'uranium.....3

I 2. 1 .3 Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire.....3

I 2. 1 .4 Avantages et Inconvénients.....7

I 2. 2 Les centrales hydroélectriques.....8

I 2. 2.1 Histoire.....9

I 2.2.2 Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique.....9

I 2. 2.3 Les différents types des centrales hydroélectriques.....11

A. Les de haute chute ($h > 300\text{m}$)11

B. Les de moyenne chute ($30\text{m} < h < 300\text{m}$)12

C. Les de basse chute ($h < 30\text{m}$)12

I 2. 2.4 Avantages et Inconvénients.....12

I 2.3 Les centrales solaires.....13

I 2.3.1 Les avantages et l'inconvénients.....14

I 2.4 Les centrales éoliennes.....15

I 2.4 1 Histoire.....16

I 2.4 2 Principe de fonctionnement.....	16
I 2.4 3 Composantes d'une éolienne.....	16
I 2.4.4 Les avantages et l'inconvénients.....	17
I 2.5 Les centrales thermiques.....	18
I 2.5.1 Principe de fonctionnement d'une centrale thermique.....	19
I2.5.2 Description des principes organes d'une centrale thermique.....	20
A) Chaudière.....	20
B) Le combustible.....	21
C) La turbine.....	21
D) Le condenseur.....	22
E) L'alternateur.....	23
I 2.5.3 Avantages et inconvénients.....	23
I 2.5.4 Chaine énergétique.....	23
Conclusion.....	24

Chapitre II

Description des analyses énergétiques et exergetiques.

II 1 Introduction.....	25
II 2 L'exergie : L'énergie disponible.....	25
II 4 Le travail réversible et l'irréversibilité.....	28
II.4. Approche énergétique.....	30
II.5 Approche exergetique.....	30
II.5.1 -Bilan exergetique.....	33
II.5.2 Terminologie et symbolisme.....	36

II.6 Coenthalpie.....	36
II.6.1 Définition.....	36
II. 7 Perte exergetique.....	37
II.7.1 Définition.....	37
Conclusion.....	37

Chapitre III

Etude exergetique de la centrale thermique à Vapeur.

III.1. Introduction.....	38
III.1.1. Analyse exergetique du condenseur.....	38
II.1. 2. Analyse exergetique d'une turbine à vapeur.....	40
III.1.3. Analyse exergetique de la chaudière.....	41
III.2. Application de l'analyse exergetique dans une central thermique à vapeur.....	43
III.2.1. Description superficielle de la centrale industrielle	43
III.2.2- Principe de fonctionnement d'une centrale.....	45
III.2.3. Propriété thermodynamique du fluide dans les différents points de la centrale.....	47
III.2.4. Diagramme (T – S)	48
III.2.5. Analyse exergetique du condenseur	49
III.2.6. Analyse exergetique de la turbine.....	50
III.2.6.1. Le corps haute pression (HP).....	50
III.2.6.2. Le corps moyenne pression (MP).....	51
III.2.6.3. Le corps moyenne basse pression (BP).....	53
III.2.7. Analyse exergetique de la pompe.....	54
III.2.7.1. La pompe d'extraction.....	55
III.2.7.2. La pompe de recirculation.....	55
III.2.7.3. La pompe alimentaire (MP).....	55

III.2.7.4. La pompe alimentaire (HP).....	56
III.2.8. Analyse exergetique de la chaudiere.....	57
III.2.8.1. Calcul pouvoir exergetique.....	57
III.2.8.2. Determination du debit molaire \dot{m}_B	58
III.2.8.3. La copuissance transformation du combustible.....	58
III.2.8.4. La copuissance transformation re \dot{c} u par l'eau.....	58
III.2.8.5. La perte exergetique dans la chaudiere.....	59
III.2.8.6. Le rendement exergetique.....	60
III.2.9. Bilan de la centrale.....	60
III.2.9.1. Rendement exergetique.....	60
III.2.9.2. Calcule du taux de repartition des pertes dans la centrale.....	61
III.2.10. Tableaux recapitulatifs des calculs.....	62
III.2.11. Interpretation des resultats.....	63
Conclusion	63
Conclusion generale	64
Refe r ences Bibliographiques.....	65

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

L'électricité, qui symbolise la civilisation et la modernité, occupent une place importante aussi bien dans la société que dans le domaine technologique, en raison de son importance et des nombreux avantages dont nous avons besoin dans notre vie quotidienne. En effet, l'électricité est économe en énergie, non polluante et silencieuse.

Afin d'obtenir une grande quantité d'électricité, on a besoin aussi d'une grande quantité d'énergie, mais les couts de production sont très élevés. Par conséquent, une nouvelle technologie a été trouvée, à savoir les centrales électriques.

Les centrales électriques sont une source importante et le point de départ de notre utilisation de l'énergie, ainsi qu'un site de multiples transformations et de transferts thermodynamiques, mais cela entraîne quelques pertes thermodynamiques.

Dans ce contexte, la centrale thermique que nous proposons d'étudier est le meilleur champ d'application pour réaliser une analyse exergetique plus appropriée.

L'exergie est basée sur la deuxième loi de la thermodynamique qui utilise le concept d'entropie. Ce dernier nous explique les irréversibilités thermodynamiques d'un système

Le travail présenté dans ce mémoire est construit selon trois chapitres. Dans le premier chapitre nous avons défini la signification d'une centrale thermique et nous avons abordé en détail les différentes centrales thermiques les plus importantes.

Dans le deuxième chapitre nous nous sommes concentrés sur la définition de l'exergie et le description des approches énergétiques et exergetiques.

Le troisième chapitre concerne la partie de calcul. Il présente une analyse exergetique détaillée du circuit eau-vapeur d'une centrale thermique à vapeur. En effet, les pertes exergetiques et le rendement exergetique global ont été évalués avec succès.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I

I 1 Introduction :

La centrale électrique est une installation industrielle qui produit de l'électricité en grande quantité. Plus exactement, elle permet de transformer les ressources naturelles en énergie électrique avec un système. Il existe différents types de centrales énergétiques. Dans ce chapitre, nous détaillerons les plus importantes [1].

I 2 Généralités :

I 2 1 Les Centrales Nucléaires :

Généralement, une centrale nucléaire fonctionne de manière similaire à une centrale classique. C'est un système industriel qui utilise la fission de noyaux atomiques pour produire de la chaleur, dont une partie est transformée en électricité (entre 30 % et 40 % en fonction de la différence de température entre la source froide et la source chaude). La génération de vapeur dans une centrale nucléaire peut être obtenue par la libération de chaleur dégagée par la fission de l'uranium [2].

Les centrales nucléaires comporte deux circuits indépendants :

- * Un circuit primaire (chauffage).
- * Un circuit secondaire (énergie).

I 2. 1 .1 Histoire :

La première production d'électricité d'origine nucléaire date de 1951. Ainsi, en une vingtaine d'années, l'énergie nucléaire est passée de la connaissance de ses premiers principes à sa démonstration pratique. Après cette première application de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité aux États-Unis, le Royaume-Uni (1953), la Russie (le 27 juin 1954, la première centrale nucléaire civile fut connectée au réseau électrique à Obninsk en Union soviétique), la France (1956) et l'Allemagne (1961) lui ont emboîté le pas. Ainsi, cinq pays ont exploité cette source d'énergie pour produire de l'électricité dans la première décennie qui a suivi sa démonstration pratique.

Les centrales nucléaires peuvent produire des quantités considérables d'électricité à partir d'une très petite quantité de combustible. Une seule pastille de combustible nucléaire de 2,5 cm produit autant d'énergie que 807 kilogrammes de charbon, 677 litres de mazout ou 476 mètres cubes de gaz naturel [3].

I 2. 1 .2 Le combustible nucléaire-l 'uranium :

L'uranium est un métal radioactif et solide, son couleur est gris et blanc et il est présent dans le sous-sol de la terre. L'uranium peut être classé comme un métal lourd. Après avoir extrait ce métal, avant de commencer à l'utiliser, le processus de traitement et de raffinage est d'abord effectué.

En effet, l'uranium est un métal qui peut être utilisé dans diverses applications, telles que la production d'énergie nucléaire, la fabrication de munitions et la médecine. Cependant, son utilisation peut également avoir des effets négatifs sur l'environnement et la santé humaine [4].

I 2. 1 .3 Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire :

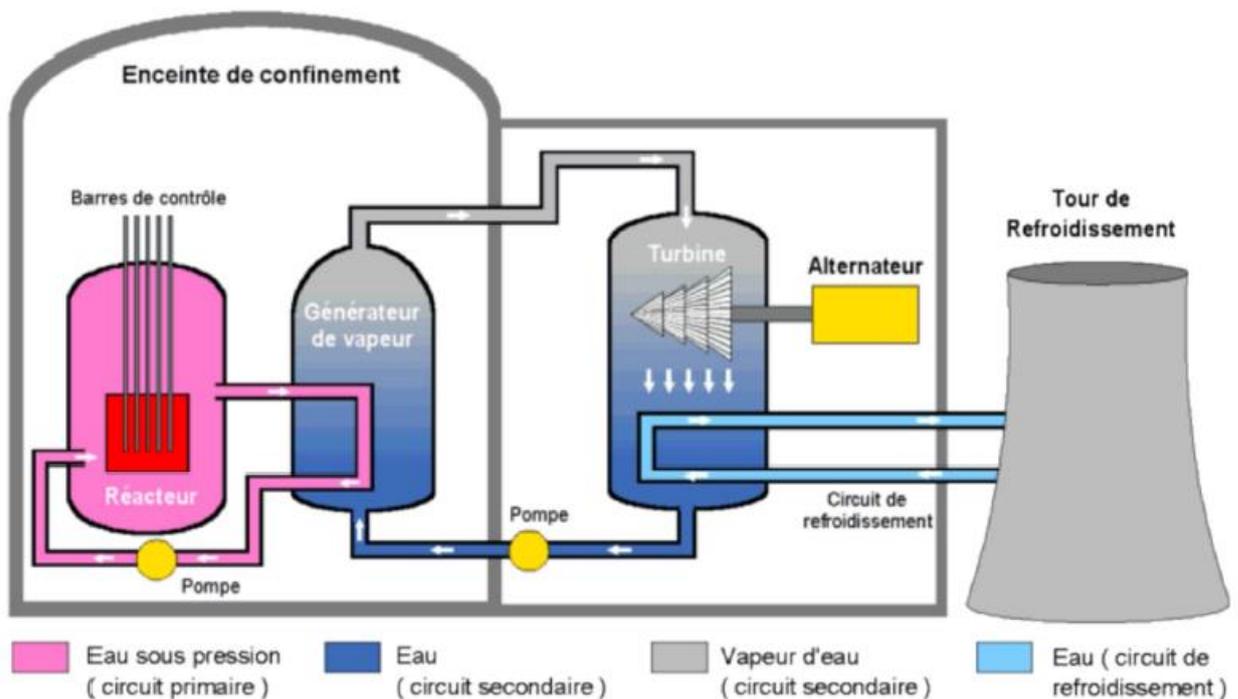
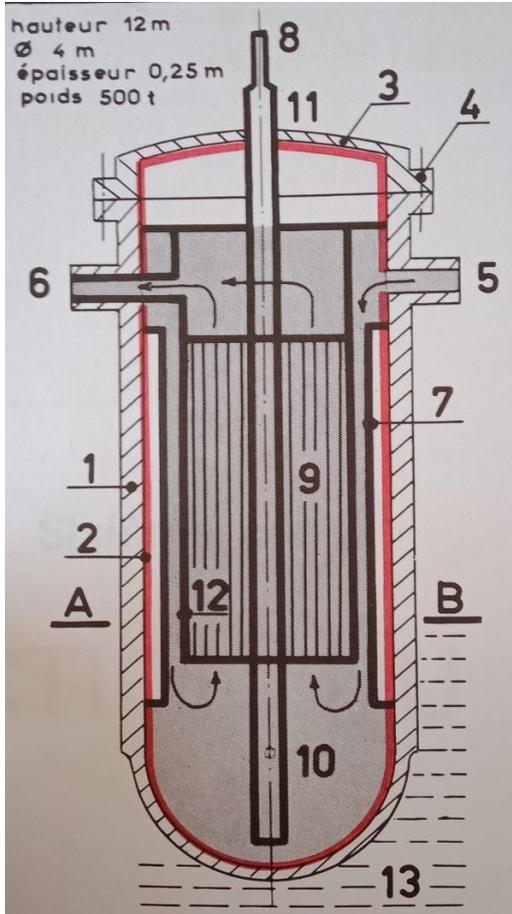


Figure 1 : Fonctionnement d'une centrale nucléaire. [4]

Dans les centrales nucléaires (Figure 1), relevant de la filière à eau sous pression, la production d'électricité, ainsi que le refroidissement et l'évacuation de la chaleur, s'effectuent selon le processus suivant :

- **Circuit primaire** : pour extraire la chaleur. Il se compose :

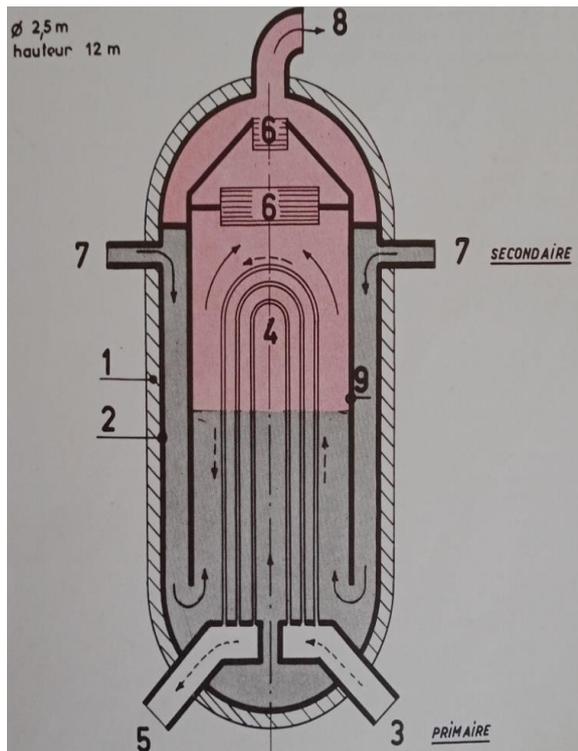
- *d'un réacteur (Figure 2)*: Cuve en acier comportant le noyau combustible baignant dans le flot d'eau primaire qui le refroidit sans arrêt ; [2]



- (1) : Cuve cylindrique
- (2) : Gaine
- (3) : Couvercle
- (4) : Goujons
- (5) : Tubulure
- (6) : Tubulure
- (7) : Ecran thermique
- (8) : Tubulure
- (9) : Assemblage combustible
- (10) : Barre de réglage
- (11) : Couvercle extérieur
- (12) : Cylindre
- (13) : Blindage neutronique

Figure 2 : un réacteur. [2]

- *d'un générateur de vapeur (Figure 3)*: cuve comportant l'eau du circuit secondaire traversée par de nombreux serpentins dans les quels passe l'eau pure du circuit primaire [2].



- (1) : Un cylindre en acier spécial
- (2) : Gain
- (3) : Tubulure
- (4) : faisceau tubulaire
- (5) : Tubulure
- (6) ; (6) : Deux sécheurs de vapeur
- (7) ; (7) : Tubulure
- (8) : Tubulure
- (9) : Un écran directionnel

Figure 3 : un générateur. [2]

- *d'une pompe primaire* : absolument étanche à haute pression et pendant de longues périodes [2].

Le combustible nucléaire, constitué d'uranium sous forme de pastilles, est inséré dans des gaines métalliques étanches, qui sont ensuite placées dans une cuve en acier remplie d'eau. Ces assemblages forment le cœur du réacteur et sont au centre de la réaction nucléaire, ce qui provoque une importante élévation de température, chauffant ainsi l'eau de la cuve à plus de 300°C. Cette eau est maintenue sous pression de 155 bars pour l'empêcher de bouillir. La chaleur produite par l'eau du circuit primaire est transmise à l'eau circulant dans un autre circuit fermé [2].

Le système primaire permet de transporter la chaleur produite par la fission de l'uranium à l'intérieur du noyau grâce à la circulation d'un courant d'eau pure. La chaleur extraite du noyau est transférée au circuit secondaire par l'intermédiaire du générateur de vapeur. La pompe est utilisée uniquement pour compenser les pertes de charge dans les serpentins, pouvant atteindre 50 à 60 N/Cm². Dans le générateur, de la vapeur saturée est produite sous une pression de 350N/Cm² [5].

- Le circuit secondaire :

Il se compose :

- d'un générateur de vapeur
- d'un surchauffeur alimenté par des combustibles fossiles (mazout, charbon) ;
- d'une turbine à vapeur ;
- d'un condenseur ;
- d'une pompe de circulation.

La chaleur est transférée via un générateur de vapeur, où l'eau du circuit secondaire est chauffée au contact des tubes traversés par l'eau du circuit primaire. Cette eau se transforme alors en vapeur, qui fait tourner la turbine entraînant l'alternateur produisant de l'électricité. Après avoir traversé la turbine, la vapeur est refroidie, retransformée en eau et renvoyée vers le générateur de vapeur pour un nouveau cycle [5].

- Circuit de refroidissement : Pour condenser la vapeur et évacuer la chaleur.

Afin de maintenir le fonctionnement continu du système, il est crucial de le refroidir. Pour ce faire, un troisième circuit indépendant des deux autres, appelé circuit de refroidissement, est mis en place. Il a pour rôle de condenser la vapeur qui sort de la turbine grâce à un condenseur composé de milliers de tubes dans lesquels circule de l'eau froide provenant d'une source extérieure telle qu'une rivière ou la mer. La vapeur est ainsi transformée en eau et cette dernière est légèrement échauffée avant d'être rejetée à la source d'origine. Des tours de refroidissement, ou aéroréfrigérants, sont utilisées si le débit de la rivière est insuffisant ou pour limiter son échauffement. L'eau échauffée provenant du condenseur est répartie à la base de la tour et refroidie par le courant d'air qui monte dans la tour. La plupart de cette eau retourne au condenseur, mais une petite quantité s'évapore dans l'atmosphère, créant ainsi les panaches blancs caractéristiques des centrales nucléaires [5].

I 2. 1 .4 Avantages et Inconvénients :

Avantages : On peut citer :

- Combustible nucléaire peu onéreux ;
- Pas d'émission de gaz à effet de serre pour la production d'électricité ;
- Forte densité énergétique.

Inconvénients : Elles sont :

- Risque des centrales nucléaires (explosion, fuite, ex ...) ;
- Stockage des déchets nucléaires radioactifs (période de désintégration des éléments radioactifs très variables jusqu'à plusieurs millions d'années) ;
- Acceptabilité sociale complexe ;
- Criticité d'impact en cas d'incident.

I 2. 2 Les centrales hydroélectriques :

Les centrales hydroélectriques (Figure 4) exploitent l'énergie mécanique de l'eau pour actionner la turbine et l'alternateur. Cette énergie provient du mouvement de l'eau, qui peut être converti en électricité grâce aux centrales hydrauliques. La turbine est alimentée en eau par un canal, puis mise en rotation par la pression de l'eau sur ses ailettes, entraînant ainsi le générateur qui produit de l'électricité. La vitesse de rotation de la turbine, et donc la quantité d'électricité produite, dépendent de la pression de l'eau. Plus cette dernière est élevée, plus la turbine tourne rapidement. Pour alimenter la centrale hydraulique, une retenue d'eau est utilisée, généralement créée par un barrage construit dans une vallée pour stocker un volume important d'eau [6].



Figure 4 : Une centrale hydroélectrique. [6]

I 2. 2.1 Histoire :

Les barrages semblent avoir existé dès les premières civilisations (un des plus anciens connus est celui de Saad-El-Kafara en Egypte, 2600 av. JC)

Aux alentours de l'an 1000, les moulins prolifèrent en Europe $\eta = (15 - 25\%)$.

La révolution industrielle pousse les ingénieurs, dès le début du XIXème siècle, à améliorer les rendements :

- ❖ 1824 : apparition du terme turbine du latin turbins « qui tourne en rond » ;
- ❖ 1827 : Fourneyron crée les 1ères turbines industrielles ($\eta=70-80\%$) ;
- ❖ 1869 : Bergès invente l'expression houille blanche, popularisée à l'expo universelle de 1889 ;
- ❖ 1871 : invention de la dynamo à courant continu ;
- ❖ 1880 : 1^{ères} centrales hydroélectriques ;
- ❖ 1901 : 1^{ères} alternateur à courant alternatif sur les chutes du Niagara [6].

I 2.2.2 Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique :

L'électricité est produite par une centrale hydraulique (Figure 5) qui exploite la différence de hauteur entre deux niveaux d'eau pour actionner une turbine reliée à un alternateur. Cette différence de hauteur, également appelée chute d'eau, met en mouvement la turbine qui génère de l'électricité. [7]

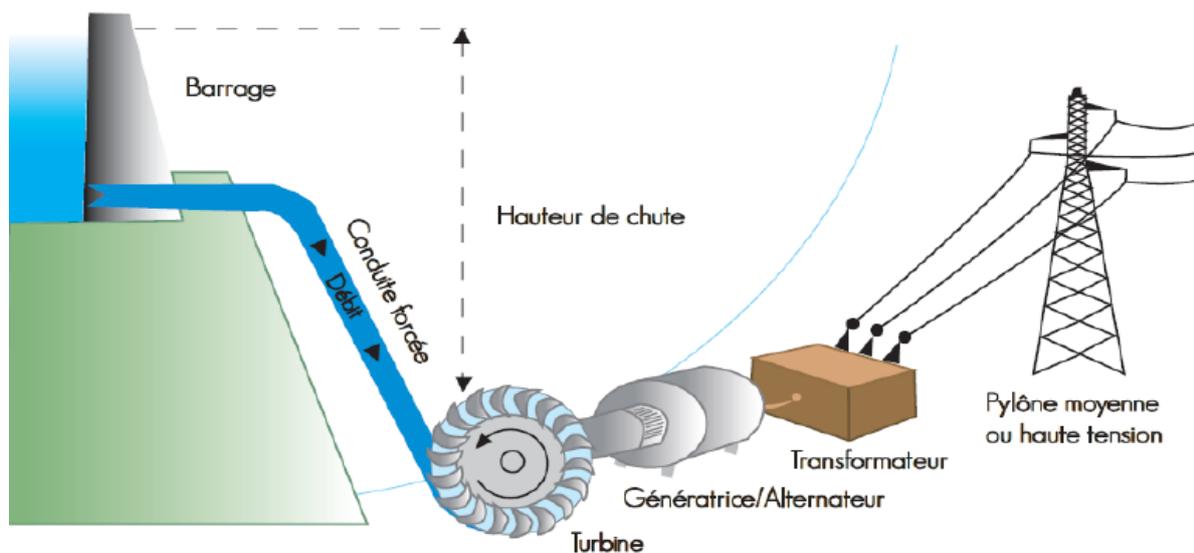


Figure 5 : Fonctionnement d'une centrale hydraulique. [7]

- La retenue de l'eau :

Le barrage retient le cours naturel de l'eau, entraînant l'accumulation d'importantes quantités d'eau qui forment un lac artificiel de retenue [7].

- La conduite forcée de l'eau :

Après avoir stocké l'eau, les vannes sont ouvertes pour permettre à l'eau de s'engouffrer dans des conduites forcées métalliques de grande longueur. Ces conduites acheminent l'eau vers la centrale hydraulique, qui se trouve en contrebas [7].

- La production d'électricité :

Une fois arrivée dans la centrale, l'eau qui s'écoule à travers la conduite met en mouvement une turbine qui entraîne un alternateur. Cette conversion de l'énergie hydraulique en énergie électrique est rendue possible grâce à la rotation de la turbine, qui alimente l'alternateur. La puissance de la centrale varie en fonction de la hauteur de la chute et du débit d'eau, plus ces paramètres sont élevés, plus la puissance produite sera importante [7].

- L'adaptation de la tension :

Après la production d'énergie électrique par l'alternateur, un transformateur est utilisé pour augmenter la tension du courant, facilitant ainsi son transport dans les lignes à haute et très haute tension. L'eau qui a été utilisée pour faire tourner la turbine, et qui a perdu de sa puissance, est évacuée par un canal spécifique appelé canal de fuite, pour rejoindre la rivière [7].

- Quelques organes d'une centrale hydraulique : Les Figures 6, 7 et 8 visualisent les principaux organes d'une centrale hydroélectrique.



Figure 6 : TURBINE. [3]



Figure 7 : ROTOR. [3]



Figure 8 : SALLE DES GÉNÉRATEURS. [3]

12. 2.3 Les différents types des centrales hydroélectriques :

Suivant la hauteur de chute d'eau on distingue 3 types [3].

A. Les centrales de haute chute ($h > 300m$) :

Les centrales de haute chute ont des hauteurs supérieures à 300 m ; elles utilisent des turbines Pelton (Figures 8 et 9).



Figure 9 : Roue PELTON. [3]

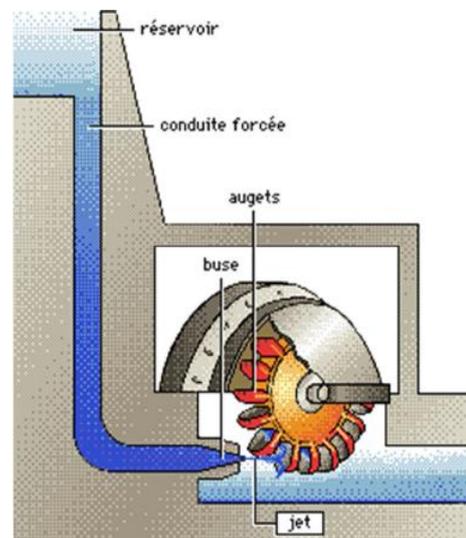


Figure 10 : Turbine PELTON. [3]

B. Les centrales de moyenne chute ($30m < h < 300m$) :

Les centrales de moyenne chute (Figure 11) ont des hauteurs comprises entre 30m et 300 m ; elles utilisent des turbines Francis. (Figure 12).

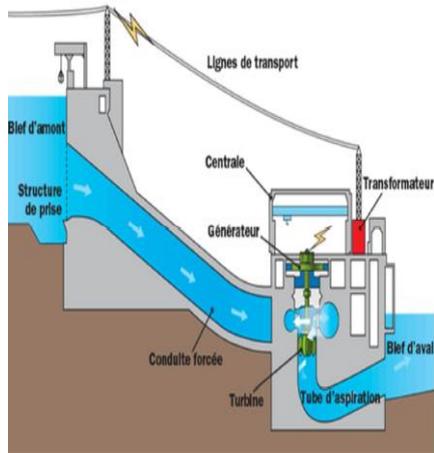


Figure 11 : Centrale hydraulique de moyenne chute. [3]



Figure 12 : Turbine FRANCIS. [3]

C. Les centrales de basse chute ($h < 30\text{m}$) :

Les centrales de basse chute (Figure 13) ou centrales fil d'eau ont des hauteurs inférieures à 30 m ; elles utilisent des turbines Kaplan (Figure 14).

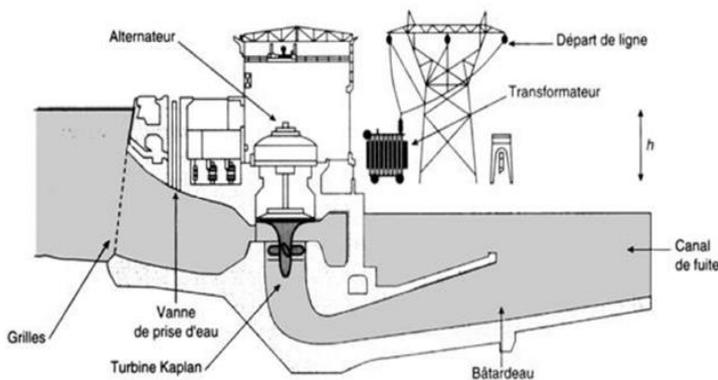


Figure 13 : Disposition d'une centrale de basse chute (au fil d'eau). [3]



Figure 14 : Turbine KAPLAN.[3]

I 2. 2.4 Avantages et Inconvénients :

Avantages : Elles ont comme avantages :

- C'est une source d'énergie propre et non polluante de l'environnement, économique et fiable ;
- Forte réactivité (Démarrage en quelques secondes) ;
- Longue durée de vie (plus de 50 ans) ;
- Coût de production d'électricité faible.

Inconvénients : Elles sont :

- Raréfaction des sites exploitables (contraintes géographiques) ;
- Acceptabilité sociétale potentiellement complexe (impact sur la continuité écologique des cours d'eau) ;
- Production d'électricité fatale pour les centrales sans stock.

I 2.3 Les centrales solaires :

Les centrales solaires (Figure 15) tirent une partie du rayonnement solaire pour générer de l'électricité en concentrant les rayons du soleil sur un liquide spécifique non vaporisable, qui est porté à une température très élevée. Ce liquide, à son tour, chauffe l'eau d'une chaudière à vapeur, qui est connectée à une turbine et à un alternateur pour produire de l'électricité. Pour revenir à l'état liquide, la vapeur d'eau est refroidie à l'aide d'une tour de refroidissement.

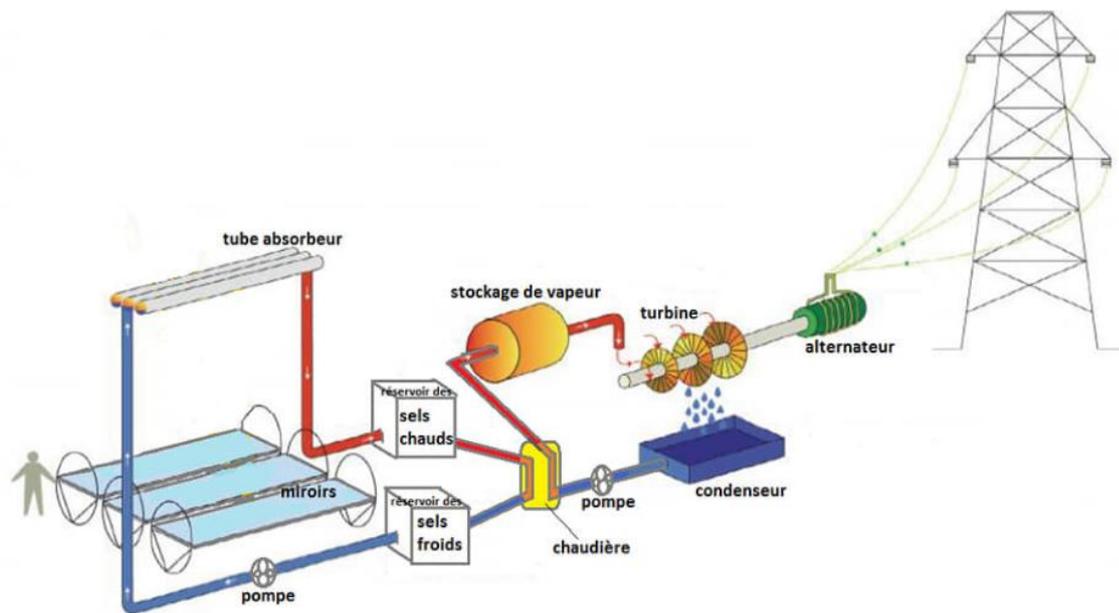


Figure 15 : La centrale solaire.[8]

Le problème des centrales solaires est qu'elles ne peuvent pas produire d'électricité la nuit.

Pour pallier à ce problème, on a deux solutions :

- Soit on stocke durant le jour une partie de la chaleur apportée par le fluide non vaporisable dans un accumulateur (cette chaleur sera libérée durant la nuit et exploitée pour produire de l'électricité) ;

- Soit on utilise des carburants fossiles comme le gaz par exemple pour chauffer le liquide non vaporisable. Pour cela, on installe dans la centrale une chaudière à gaz qui prend le relais des miroirs la nuit et qui s'arrête au matin.

Comme il existe différents moyens pour concentrer le rayonnement solaire, on aboutit à différentes centrales. Les plus courantes sont :

- **Les collecteurs cylindro-paraboliques** : Ce modèle est le plus utilisé en termes d'énergie thermique solaire, qui sont de longs miroirs cylindriques qui concentrent les rayons sur un tuyau dans lequel un liquide est chauffé. Le fluide est dirigé vers le cœur de la centrale, la chaudière.
- **Les centrales à tour** : Les miroirs posés au sol concentrent la chaleur vers une chaudière placée en hauteur sur une tour. Ils sont placés en cercle ou en demi-cercle.
- **Les centrales à collecteurs paraboliques** : Le miroir prend la forme d'une antenne parabolique. Il renvoie les rayons du soleil vers un petit moteur placé au centre de la parabole sur des axes. Ce moteur peut alors produire de l'énergie mécanique qu'il convertit en électricité [8].

I 2.3.1 Avantages et inconvénients :

Avantages : On peut citer :

- L'énergie solaire est une énergie renouvelable ;
- Comme vous utilisez une énergie gratuite et inépuisable, vous gagnez en indépendance à l'égard des fournisseurs d'énergie en atteignant l'autoconsommation ;
- En fonction du type d'installation, vous assurez une partie de vos besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage ;
- L'installation de panneaux solaires augmente la valeur de votre bien.

Inconvénients : Elles sont :

- L'installation solaire est soumise à plusieurs critères comme l'orientation de la maison par rapport au soleil, les conditions imposées par le plan local d'urbanisme ;
- En hiver, l'installation est un peu moins performante. Il est donc nécessaire de la coupler à un chauffage d'appoint qui prendra le relais ;

- La durée de vie de votre installation solaire est de 20 ans en moyenne, après quoi, son efficacité décroît. Pour bénéficier de son fonctionnement optimal, vous devrez donc envisager de la remplacer.
- L'installation de panneaux solaires peut avoir un impact visuel polluant qui affecte négativement le paysage.
- La performance est fonction de la météo. Par exemple, dans les zones à ciel généralement nuageux, les performances sont très faibles.

I 2.4 Les éoliennes :

Un dispositif appelé éolienne (Figure 16) tire une partie de la force du vent pour soit pomper de l'eau, soit générer de l'électricité. Les éoliennes les plus courantes sont celles utilisées pour produire de l'électricité. L'énergie mécanique générée par le vent a été utilisée pendant des siècles pour moudre le grain ou pomper de l'eau. Les éoliennes actuelles sont principalement utilisées pour produire de l'électricité éolienne, qui peut être consommée localement (pour des sites isolés) ou injectée dans le réseau électrique (pour les éoliennes connectées au réseau) [8].

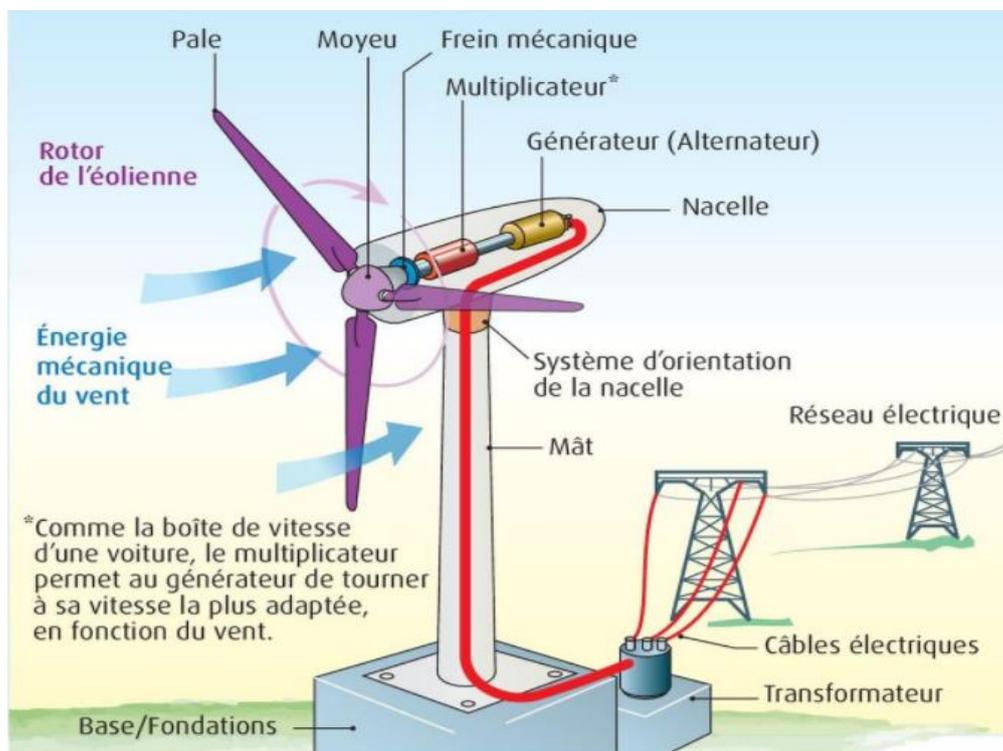


Figure 16 : Une centrale éolienne.[8]

I 2.4 1 Histoire :

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 dite « industrielle » (qui pouvait produire de l'électricité) fut créée en 1890 par Charles BUSH. Cette technologie ne rencontra pas un grand succès, sûrement à cause du choc pétrolier des années 1970 [10].

I 2.4 2 Principe de fonctionnement :

Lorsque le vent souffle, l'hélice, également appelée rotor, commence à tourner, entraînant ainsi les pales. Le rotor est généralement positionné au sommet d'un mât afin de profiter de vents plus forts en altitude. En tournant, l'hélice actionne un axe situé dans la nacelle, qui est relié à un alternateur produisant de l'électricité. Pour s'adapter à la fréquence du réseau électrique auquel elle est connectée, des convertisseurs électroniques de puissance sont utilisés pour ajuster la fréquence du courant produit par l'éolienne, tout en permettant au rotor de tourner à une vitesse variable en fonction de la force du vent [10].

I 2.4 3 Composantes d'une éolienne : Elles sont (Figure 17) :

- **Le mât** : il permet de déplacer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement, le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande multiplicateur, générateur, etc..) [11].
- **Le rotor** : composé de trois pales en général et du nez de l'éolienne, il est entraîné par l'énergie du vent et peut être couplé directement ou indirectement à une pompe (cas des éoliennes à pompage) ou plus généralement à un générateur électrique. Il est lié à la nacelle par le moyeu [11].
- **La nacelle** : elle est montée au sommet du mât abritant les composants mécaniques, pneumatiques, [2] certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine (dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite par ce mât électromagnétique).
- **Les pales** : elles représentent les éléments les plus importants du rotor, [2] et elles sont le convertisseur de l'énergie cinétique du vent en couple mécanique (il y a plusieurs points à prendre en contact pour la construction des pales qui sont l'aérodynamisme et la structure).

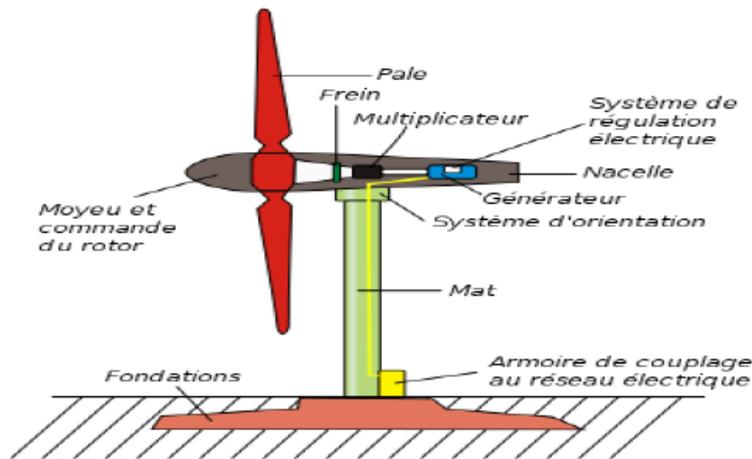


Figure 17 : Les différents éléments d'une éolienne.[11]

I 2.4.4 Les avantages et l'inconvénients :

Avantages :

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement ;
 - L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles ;
 - L'énergie éolienne n'est plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs donc on connaît la durée de vie ;
 - Les parcs éoliens se démontent facilement ;
 - L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains :
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie, c'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
 - Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie pour se développer.
 - L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
 - Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.
 - Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
 - L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelles sources d'énergie traditionnelle.

Inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a certains inconvénients :

- L'impact visuel. Ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci évitent les aérogénérateurs.
- La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastiques, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.

I 2.5 Les centrales thermiques :

Une centrale thermique (Figure 18) est une centrale électrique qui produit de l'électricité à partir de la vapeur d'eau produite grâce à une source de chaleur dégagée par la combustion de gaz, (charbon ou fioul), qui met en mouvement une turbine reliée à un alternateur.

L'énergie thermique est donc transformée en énergie mécanique puis en énergie électrique grâce à un général [3].

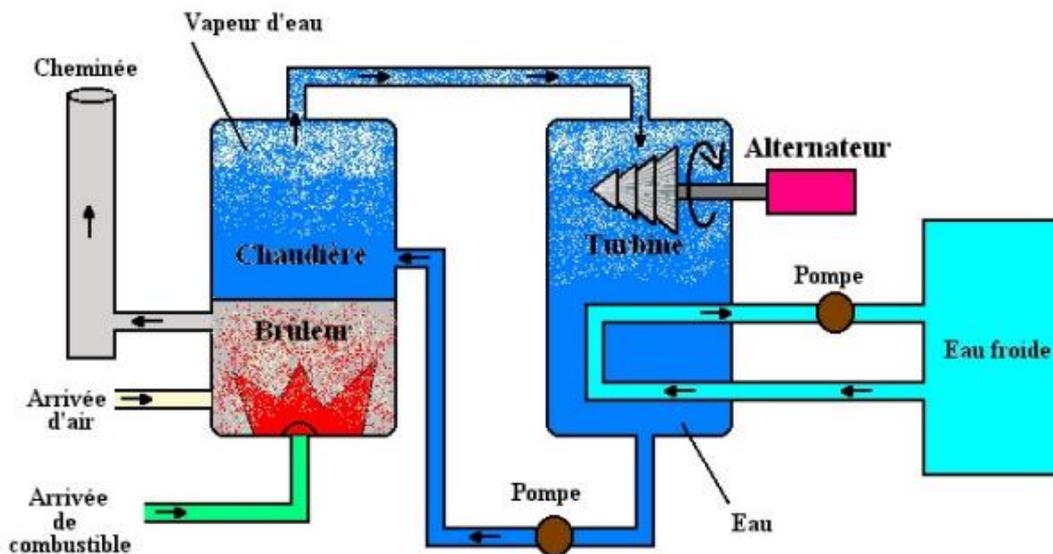


Figure 18 : Centrale thermique.[3]

I 2.5.1 Principe de fonctionnement d'une centrale thermique (Figure 19) :

Les centrales thermiques utilisent des ressources naturelles telles que le charbon, le fioul ou le gaz. Le combustible est brûlé pour produire de la chaleur, qui est ensuite utilisée pour chauffer l'eau située dans des tubes le long des parois de la chaudière. La chaleur transforme alors l'eau en vapeur sous pression, qui fait tourner la turbine. Cette dernière entraîne à son tour l'alternateur pour produire de l'électricité [3].

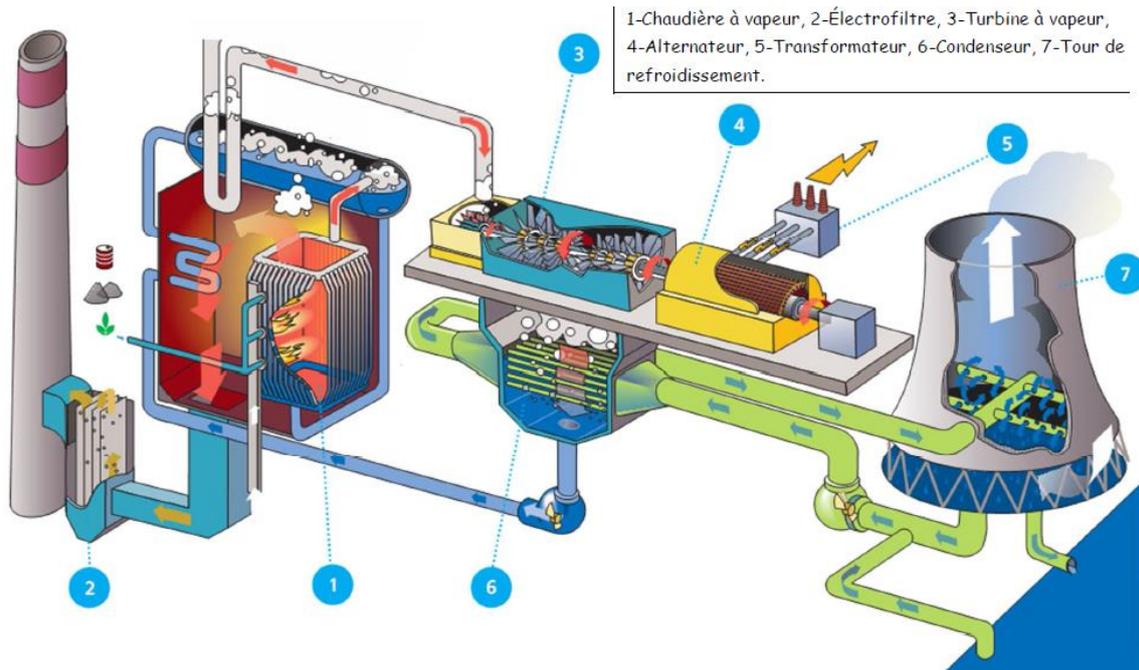


Figure 19 : principe de fonctionnement d'une centrale thermique.[3]

La centrale produit alors de l'électricité à partir de la dilatation de la vapeur. Ensuite la vapeur est transformée en eau par un condenseur, puis renvoyée vers la chaudière pour un nouveau cycle.

Le schéma de principe d'une centrale thermique à vapeur contient les éléments suivants :

- **Une chaudière** : dont laquelle l'eau se transforme en vapeur surchauffée.
- **Des tuyauteries de liaison** : pour transporter la vapeur d'eau de la chaudière vers la turbine.
- **La turbine à plusieurs corps** : qui reçoit la vapeur surchauffée.
- **Un condenseur** : qui permet de condenser la vapeur sortante de la turbine en cédant une partie de sa chaleur à l'eau de circulation qui sert à la condensation (pression atmosphérique).

- **Les tuyauteries de liaison** : pour transporter de l'eau liquide condensée du condenseur vers la chaudière.
- **L'alternateur** : qui sert à produire l'énergie électrique. L'ensemble turbine alternateur est appelé turboalternateur.
- **Poste de transformation** : chargé de porter la tension produite par l'alternateur à la tension du réseau.

I 2.5.2 Description des principaux organes d'une centrale thermique :

A) **Chaudière** : La chaudière de la centrale thermique à vapeur, contient les éléments suivants :

- **La chambre de combustion (C.C)** : dont laquelle un combustible est brûlé pour produire l'énergie calorifique qu sert à transformée l'eau liquide en vapeur.
- **Le réservoir de vapeur (R.V)** : dont lequel un liquide est transformé en vapeur.
- **Surchauffeur (Su)** : qui sert à faire augmenter la température de la vapeur.
- **Resurchauffeur (Rsu)** : il reçoit la vapeur provenant du corps HP de la turbine pour la renvoyée vers les corps MP et BP. (Pour améliorer le rendement)
- **L'économiseur (E)** : il reçoit l'eau liquide provenant du condenseur et augmente sa température de certain degré avant de l'envoyé vers le réservoir de vapeur (pour améliorer aussi le rendement) [3].

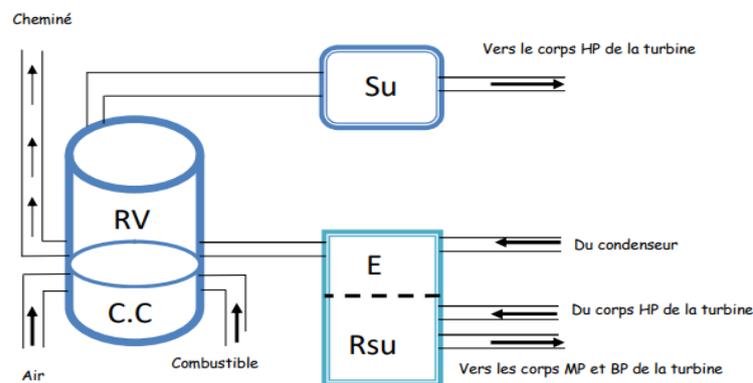


Figure 20 : schéma d'une chaudière.[3]

RV : réservoir de vapeur. C.C : chambre de combustion. E : économiseur.

Su : surchauffeur. Rsu : resurchauffeur.

B) Le combustible :

Plusieurs types de combustibles sont utilisés pour produire de la vapeur dans les centrales, tels que le charbon, le gaz et le pétrole. Cependant, une grande quantité de chaleur est nécessaire pour transformer l'eau en vapeur, ce qui implique une grande quantité de combustible. Cela pose un problème de transport entre la source de combustible et la centrale. Le pétrole est transporté par voie maritime, le charbon par voie maritime ou ferroviaire et le gaz par des tuyauteries ou voie maritime.

Pour que la combustion ait lieu, de l'oxygène (de l'air) est nécessaire. Avant d'être utilisé, l'air est chauffé à travers des tuyaux à l'intérieur de la chaudière pour faciliter la combustion. Toutefois, l'augmentation de la température doit être modérée pour éviter le risque de condensation de l'eau dans les gaz d'échappement, ce qui peut provoquer la corrosion de la cheminée [3].

C) La turbine :

La fonction de la turbine est de convertir l'énergie de la vapeur, qui est à la fois haute en température et en pression, en travail mécanique de rotation, en utilisant le frottement sur ses ailettes [3].

* Pour les centrales à petites puissances (100 MW), on utilise des turbines à un seul corps.

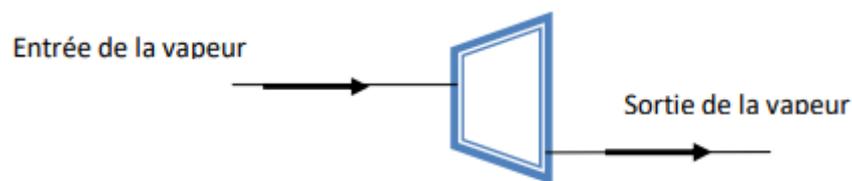


Figure 21 : turbine à un seul corps.[3]

* Pour les centrales à grandes puissances (>100 MW), on utilise des turbines à plusieurs corps (02 corps par exemple).

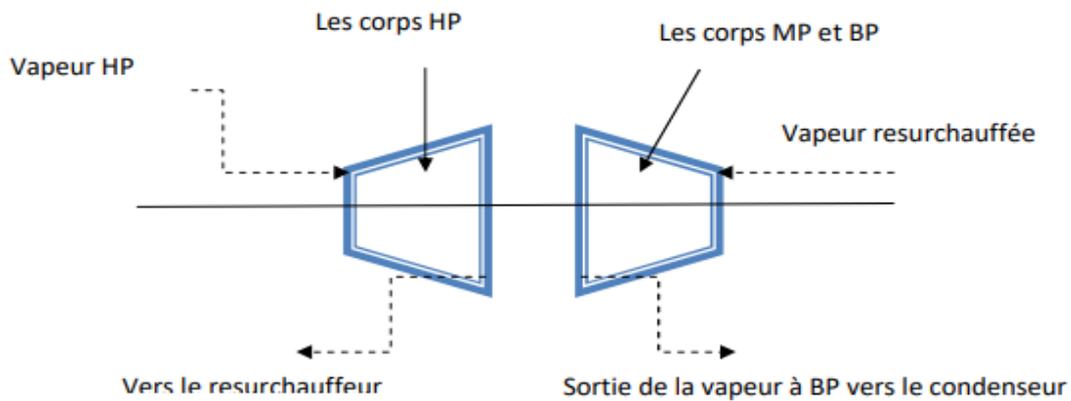


Figure 22 : Turbine à plusieurs corps.[3]

La turbine est constituée d'un stator et d'un rotor, chaque partie étant composée d'une ou plusieurs couronnes. Les ailettes sont fixées sur les couronnes du rotor.

D) Le condenseur :

Le condenseur (Figure 23) est un élément essentiel pour le fonctionnement du circuit de vapeur, qui constitue le moteur thermique. Pour qu'un moteur thermique fonctionne, il est nécessaire d'avoir deux sources : une chaude et une froide. Dans ce cas, l'eau de refroidissement du condenseur est la source froide et elle doit être en quantité suffisante. Cette eau peut provenir d'une source naturelle [3].

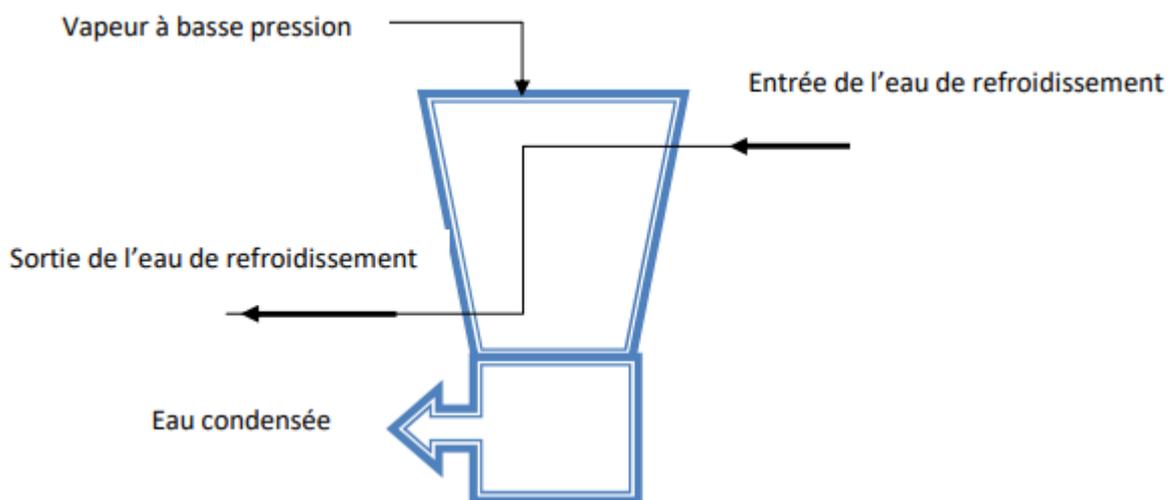


Figure 23 : schéma d'un condenseur.[3]

E) L'alternateur :

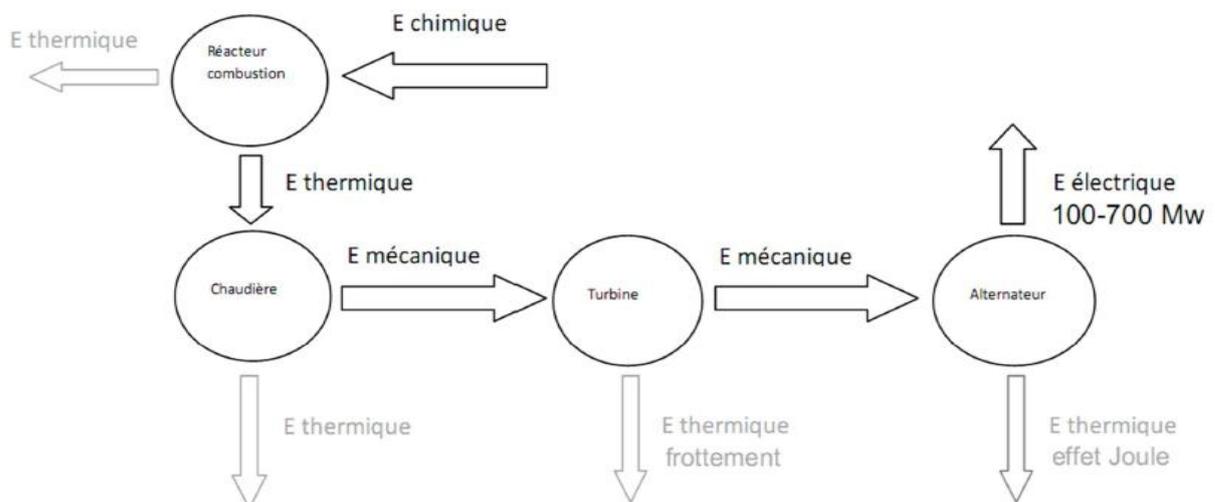
L'alternateur est une machine qui convertit l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique. Il est constitué de deux systèmes imbriqués, à savoir le rotor mobile et le stator fixe. La conversion s'opère selon la loi d'induction de Faraday qui stipule que tout champ magnétique alternatif ou mobile induit un courant électrique dans un circuit conducteur. Les composants essentiels du rotor et du stator sont des spires métalliques, un bobinage en cuivre ou en aluminium, ainsi qu'un empilage de tôles magnétiques. La rotation du rotor engendre une tension alternative [3].

I 2.5.3 Avantages et inconvénients :**Avantages :**

- Technologie bien maîtrisée présentant peu de risque.

Inconvénients :

- Les centrales thermiques sont des moyens de production d'énergie très sales.
 - Elles rejettent dans l'atmosphère énormément de gaz à effet (principalement du dioxyde de carbone CO₂).
 - Elles sont responsables des pluies acides et de la pollution de l'air.
- Epuisement des ressources (pétrole, gaz).
- Faible rendement.

I 2.5.4 Chaîne énergétique :

Conclusion :

Au cours de ce chapitre, notre objectif a été de présenter les diverses centrales de production d'énergie, en examinant en détail leur mode de fonctionnement ainsi que les composants clés qui y sont impliqués.

CHAPITRE II

II 1 Introduction :

La deuxième loi de la thermodynamique enseigne qu'au cours d'une évolution, la qualité de l'énergie est dégradée.

Cette détérioration de la qualité de l'énergie est estimée selon la production d'entropie ou encore selon la perte de potentiel à faire du travail utile. Ce potentiel à faire du travail utile est appelé l'exergie. La notion d'exergie et son utilisation en vue de quantifier les effets des irréversibilités dans les évolutions de divers systèmes.

Dans ce chapitre nous donnons les principes de base de l'exergie et nous décrivons par la suite le fondement mathématique des approches énergétique et exergétique.[12]

II 2 L'exergie : L'énergie disponible :

Lorsqu'une nouvelle source d'énergie est découverte, comme un puits géothermique ou un gisement de pétrole, on s'empresse d'estimer la quantité d'énergie recelée dans le réservoir. Bien que précieuse, cette information est incomplète. Qu'en est-il de l'énergie disponible, c'est-à-dire de l'énergie qui peut être transformée en travail utile ? Cette propriété de l'énergie est parfois appelée énergie disponible, parfois disponibilité ou tout simplement exergie.

L'exergie d'un système dans un état donné est équivalente au travail utile maximal qui peut être produit en théorie par ce système. Rappelons que le travail effectué durant une évolution dépend des états initial et final du système ainsi que du parcours que suit l'évolution, soit

$$\text{Travail} = f(\text{état initial, parcours, état final})$$

Dans une analyse exergétique, c'est-à-dire une analyse qui cherche à déterminer l'énergie utile disponible, l'état initial est généralement défini. Cet état n'est donc pas une variable. On sait par ailleurs que le travail produit est maximal lorsque l'évolution entre l'état initial et l'état final est réversible. L'analyse ne considère donc pas les irréversibilités. Enfin, à l'état final, le système doit se trouver en équilibre thermodynamique avec son milieu extérieur (par exemple, l'environnement). [12]

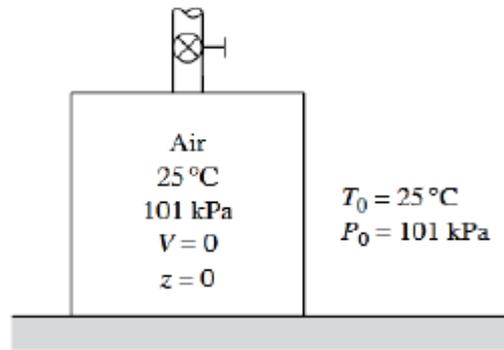


Figure 24 : Un système en équilibre avec son milieu extérieur est au point mort.[12]

Dans cet état :

- 1) la pression et la température du système sont égales à celles du milieu extérieur (équilibre mécanique et thermique) ;
- 2) l'énergie cinétique et potentielle du système par rapport au milieu extérieur est nulle (vitesse nulle et élévation nulle par rapport à un point de référence) ;
- 3) le système ne réagit pas avec le milieu extérieur (inertie chimique) ;
- 4) si elles interviennent, les forces magnétiques, électriques et de tension superficielle du système sont en équilibre avec le milieu extérieur. Cet état d'équilibre thermodynamique avec le milieu extérieur est appelé le point mort.

Au point mort, l'exergie du système est de zéro. Aucun travail ne peut être produit par un système au point mort. Les variables thermodynamiques d'un système au point mort sont identifiées par l'indice 0 : P_0 ; T_0 ; h_0 ; u_0 ; et s_0

Au moins qu'il en soit autrement, on supposera que la température et la pression au point mort sont respectivement de $T_0 = 25^\circ\text{C}$ et de

$$P_0 = 1\text{atm} = (101.325\text{KPa})$$

On définit le milieu extérieur comme le milieu qui se situe en dehors des frontières du système, ou les variables thermodynamiques ne sont pas touchées par les évolutions que parcourt le système. Toutefois, le milieu extérieur immédiat est le milieu au-delà des frontières du système, ou les variables thermodynamiques subissent l'influence des

évolutions que parcourt le système. Par exemple, en se refroidissant (l'évolution), une pomme de terre à 70%.

(Le système) chauffe l'air dans son voisinage (le milieu extérieur immédiat), mais n'influe pas sur la température de l'air dans la cuisine (le milieu extérieur) qui demeure à 25°C [12].

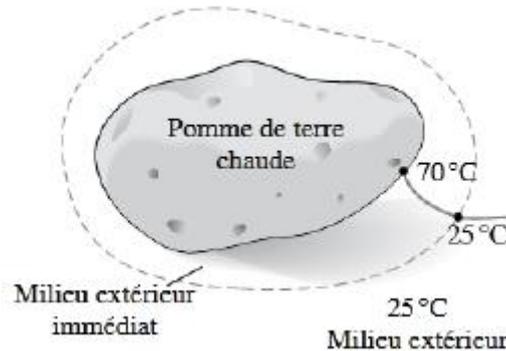


Figure 25 : Le milieu extérieur immédiat est la région au voisinage du système qui subit l'influence du système. Le milieu extérieur immédiat de la pomme de terre est la couche d'air dans laquelle la température passe de celle de la pomme de terre (70 °C) à celle de l'air environnant (25 °C).[12]

Soulignons que, si l'état final du système n'était pas le point mort (si la température de la pomme de terre n'avait pas atteint la température du milieu extérieur, par exemple), il y aurait toujours moyen de produire du travail en faisant fonctionner une machine thermique entre cet état et le point mort. Lorsqu'un système a atteint le point mort, on ne peut plus en extraire du travail utile. Vue comme un réservoir thermique, l'atmosphère dans laquelle nous baignons regorge d'énergie, mais elle est vide d'exergie. L'atmosphère est à son point mort ; on ne peut en extraire du travail utile

En résumé, pour qu'un système produise le maximum de travail, il doit parcourir une évolution réversible jusqu'à atteindre un état final qui est le point mort. Le travail maximal ainsi produit est équivalent à l'énergie disponible. Cette énergie disponible est appelée l'exergie. L'exergie n'est pas le travail réel que produit la machine.

L'exergie représente la limite théorique du travail qui peut être produit sans enfreindre les lois de la thermodynamique.

Soulignons enfin que l'exergie d'un système dépend non seulement des caractéristiques du système, mais aussi des conditions du milieu extérieur (le point mort).

L'exergie est une variable du couple système-milieu extérieur. Modifier le milieu extérieur est un moyen, pas forcément recommandé, pour accroître l'exergie [12].

II 3 Le travail réversible et l'irréversibilité :

L'exergie est un outil prisé pour déterminer la qualité de l'énergie et comparer le potentiel de différentes sources ou de divers systèmes à produire du travail utile.

Mais l'exergie ne suffit pas. Elle est basée sur un état final, le point mort, qui est rarement l'état final dans les évolutions réelles. C'est pourquoi on présente, dans cette section, deux notions qui prennent en compte l'état initial réel et l'état final réel d'une évolution. Ces notions sont le travail réversible et l'irréversibilité.

Le travail fait par une machine n'est pas toujours utile. Par exemple, lorsque le piston est soulevé dans un système piston-cylindre, une partie du travail fait par le gaz qui se détend dans le cylindre sert à déplacer l'air atmosphérique (l'air du milieu extérieur) qui exerce une pression sur le piston [12].

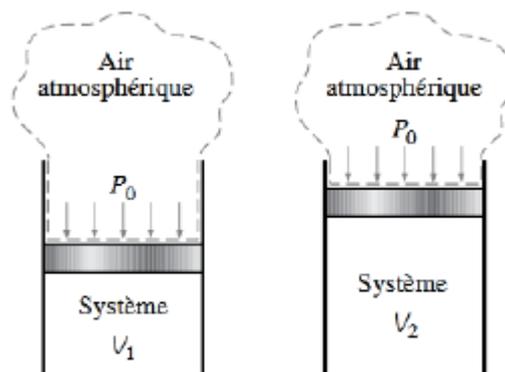


Figure 26 : Mesure qu'un système fermé se détend, du travail est fait pour déplacer l'air atmosphérique qui se trouve au voisinage (W_{env}).[12]

Ce travail, qui ne peut être récupéré et employé à bon escient, est égal au produit de la pression atmosphérique P_0 (la pression dans le milieu extérieur) par le changement du volume du système, soit :

$$W_{env} = P_0(V_2 - V_1) \quad (3.1)$$

La différence entre le travail réel produit par le système W et le travail fait sur le milieu extérieur W_{env} le travail utile W_u , soit :

$$W_u = W - W_{env} = W - P_0(V_2 - V_1) \quad (3.2)$$

Au cours d'une détente, W_{env} représente une perte de travail utile. Toutefois, durant une compression, W_{env} représente un gain. Il faut noter que W_{env} n'intervient que dans les systèmes dont la frontière est déformable W_{env} n'intervient pas dans les systèmes dont la frontière est indéformable (un réservoir rigide, une turbine, un compresseur, un échangeur, etc.) [12].

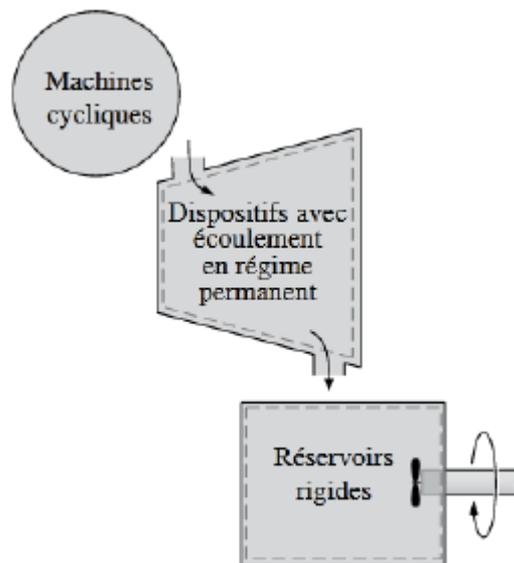


Figure 27 : Dans les systèmes dont le volume demeure constant au cours de l'évolution, le travail réel et le travail utile sont équivalents ($W = W_u$). [12]

D'autre part, le travail réversible W_{rev} est défini comme le travail utile maximal qui peut être produit lorsqu'un système parcourt une évolution entre un état initial donné et un état final donné. Si l'état final est le point mort, alors le travail réversible devient égal à

l'exergie. Si l'évolution consomme du travail, alors le travail réversible représente le travail minimal requis pour parcourir l'évolution.

La différence entre le travail réversible W_{rev} et le travail utile W_u est due aux irréversibilités qui se manifestent pendant l'évolution. Cette différence, appelée l'irréversibilité.

$$I = W_{rév,out} - W_{u,out} \quad \text{ou} \quad I = W_{u,in} - W_{rév,in} \quad (3.3)$$

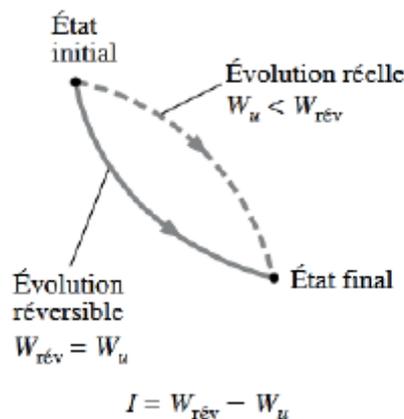


Figure 28 : La différence entre le travail réversible et le travail utile est l'irréversibilité.[12]

L'irréversibilité est équivalente à l'exergie détruite. Dans une évolution réversible, le travail réversible et le travail utile sont égaux, et l'irréversibilité est nulle. Il n'y a pas d'entropie produite. L'irréversibilité est une quantité positive, car $W_{rev} \geq W_u$ dans Les machines qui produisent du travail (une turbine) et $W_{rev} \leq W_u$ dans les machines qui en consomment (un compresseur).

L'irréversibilité est le potentiel perdu à faire du travail. C'est de I 'énergie qui aurait pu être convertie en travail, mais qui ne l'a pas été. Plus l'irréversibilité d'une évolution est petite, plus le travail produit est grand. Améliorer le rendement d'un système revient à réduire l'irréversibilité [12].

II.4. Approche énergétique :

Considérons un système quelconque, donnant lieu à des transferts-travail, des transferts-chaueur et des transferts de masse. Le système objet d'étude est représenté par la figure 29 [13] :

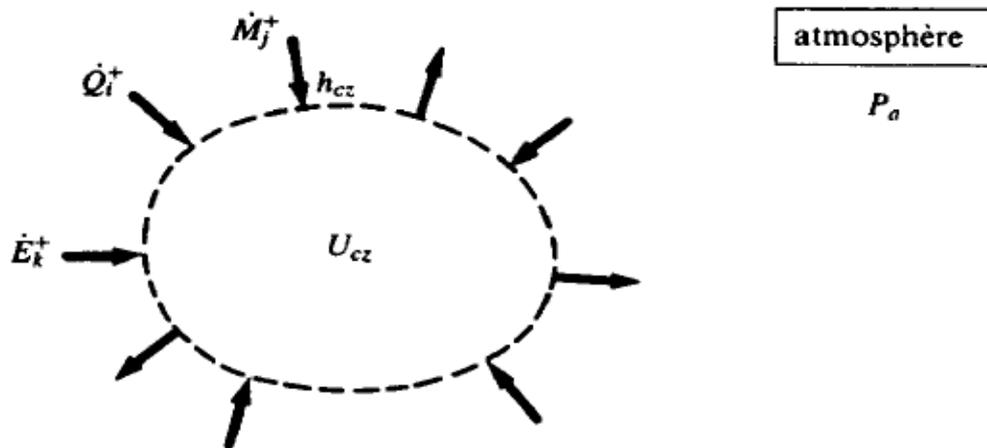


Figure 29 : Système thermodynamique quelconque [13].

Par utilisation du Premier Principe de la thermodynamique, le bilan énergétique en puissance, relatif au système quelconque de la Figure 29, est exprimé par l'équation (4.1) :

$$\frac{dU_{CZ}}{dt} = \sum_k [\dot{E}_k^+] + \sum_i [\dot{Q}_i^+] + \dot{Q}_a^+ \sum_j [\dot{h}_{CZj}^+ \dot{M}_j^+] \quad (4.1)$$

Avec :

- * U_{CZ} : Energie 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-chaleur reçue par le système, d'un système i, autre que l'atmosphère
- * $\dot{Q}_a^+ = \delta Q_a^+ / dt$: Puissance-chaleur 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

Nous constatons que le système étudié est exposé à l'atmosphère à une température T_a et à une pression P_a . Lorsque son volume V augmente de dv , une puissance-travail $P_a \frac{dv}{dt}$ 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]:

$$\sum_k [\dot{E}_{ek}^+] = \sum_k [\dot{E}_k^+] + P_a \frac{dv}{dt} \quad (4.2)$$

(4.2) peut s'écrire également :

$$\sum_k [\dot{E}_k^+] = \sum_k [\dot{E}_{ek}^+] - P_a \frac{dv}{dt} \quad (4.3)$$

Tenant compte de (4.3), l'équation (4.1) devient :

$$\sum_k [\dot{E}_{ek}^+] + \sum_i [\dot{Q}_i^+] + \dot{Q}_a^+ + \sum_j [h_{czj}^+ \dot{M}_j^+] - \frac{d(U_{cz} + P_a V)}{dt} = 0 \quad (4.4)$$

L'équation (4.4) caractérise le bilan énergétique.

L'énergie effective est :

$$U_e = U + P_a V \quad (4.5)$$

L'énergie effective totale sera alors :

$$U_{ecz} = U_{cz} + P_a V \quad (4.6)$$

Tenant compte de (4.5), l'équation du bilan énergétique (4.4) sera :

$$\sum_k [\dot{E}_{ek}^+] + \sum_i [\dot{Q}_i^+] + \dot{Q}_a^+ + \sum_j [h_{czj}^+ \dot{M}_j^+] - \frac{dU_{ecz}}{dt} = 0 \quad (4.7)$$

Également, une nouvelle fonction appelée puissance – transformation peut être définie par l'expression suivante :

$$\dot{Y}^+ = \sum_j [h_{czj}^+ \dot{M}_j^+] - \frac{d(U_{cz} + P_a V)}{dt} \quad (4.8)$$

La relation (4.8) 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.5 Approche exergetique

II.5.1 -Bilan exergetique :

Considérons à nouveau un système quelconque qui est défini par la Fig.30. [13].

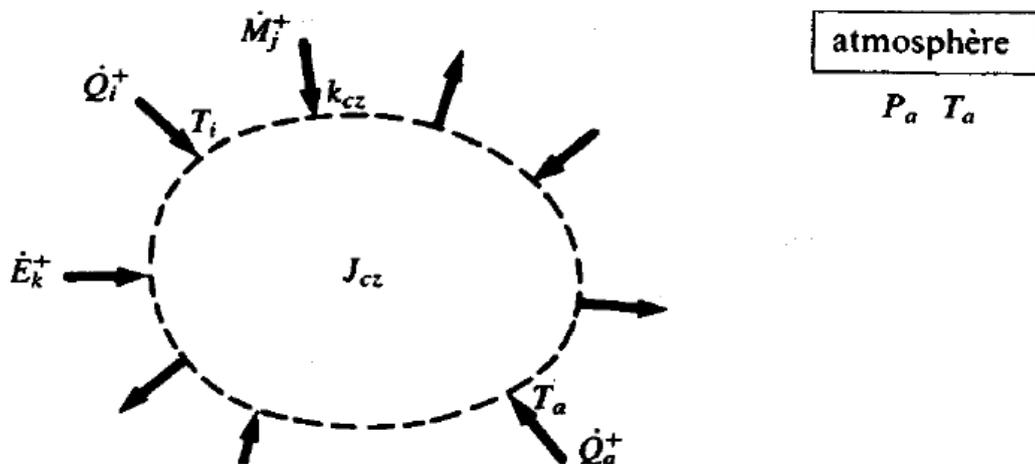


Figure :30 Système thermodynamique quelconque [13].

A partir des expressions (4.4) et (4.8), le premier principe est exprimé par le bilan énergétique [13]:

$$\sum_k [\dot{E}_k^+] + \sum_i [\int \delta \dot{Q}_i^+] + \dot{Q}_a^+ + \sum_n [\dot{Y}_n^+] = 0 \quad (4.9)$$

Avec :

- * \dot{E}_k^+ : Puissance – travail reçue par le systeme au niveau de la machine k.
- * \dot{Q}_i^+ : Puissance-chaleur reçue de la source à température T_i (dans le cas général où 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

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

puissance – transformation effective reçue au niveau du réseau n. (4.10)

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. De même pour la température T_a .

Le deuxième principe de la thermodynamique fait intervenir l'entropie. Il s'exprime par le bilan d'entropie :

$$\frac{ds}{dt} = \sum_i \left[\int \frac{\delta \dot{Q}_i^+}{T_i} \right] + \frac{\dot{Q}_a^+}{T_a} + \sum_j [s_j \dot{M}_j^+] + \dot{S}^i \quad (4.11)$$

* 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 (4.9), nous avons traité séparément la source à température T_a , constituée par l'atmosphère avec l'expression :

$$\sum_i \left[\int \frac{\delta \dot{Q}_i^+}{T_i} \right] + \frac{\dot{Q}_a^+}{T_a} \quad (4.12)$$

L'équation (4.12) peut se remplacer par : $\sum_i \left[\int \frac{\delta \dot{Q}_i^+}{T_i} \right]$.

En vertu du deuxième principe, nous avons toujours :

$$\delta \dot{S}^i \geq 0 \quad \frac{\delta \dot{S}^i}{dt} + \dot{S}^i = 0 \quad (4.13)$$

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

$$\frac{dS}{dt} \quad \text{par} \quad \sum_n \left[\frac{dS}{dt} \right]_n \quad (4.14)$$

$$\sum_j [s_j \dot{M}_j^+] \text{ par } \sum_n \left\{ \sum_j [s_j \dot{M}_j^+] \right\}_n \quad (4.15)$$

En tenant compte des substitutions indiquées ci-dessus, il est possible de mettre le bilan entropique (4.11) sous la forme :

$$\sum_i \left[\int \frac{\delta \dot{Q}_i^+}{T_i} \right] + \frac{\dot{Q}_a^+}{T_a} + \sum_n \left\{ \sum_j [s_j \dot{M}_j^+] - \frac{dS}{dt} \right\}_n + \dot{S}^i = 0 \quad (4.16)$$

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

$$\sum_i \left[\int \frac{T_a}{T_i} \delta \dot{Q}_i^+ \right] + \dot{Q}_a^+ + \sum_n \left\{ \sum_j [T_a s_j \dot{M}_j^+] - \frac{d}{dt} (T_a S) \right\}_n + T_a \dot{S}^i = 0 \quad (4.17)$$

Le bilan exergetique est obtenu en éliminant Q_a entre les équations (4.4) (1^{er} principe) et (4.17) (2^e principe). On obtient le bilan exergetique [13]:

$$\begin{aligned} \sum_k [\dot{E}_k^+] + \sum_i \left[\int \delta \dot{Q}_i^+ \right] + \dot{Q}_a^+ + \sum_n \left\{ \sum_j [h_{czj} \dot{M}_j^+] - \frac{d}{dt} (U_{cz} + P_a V) \right\} \\ - \sum_i \left[\int \frac{T_a}{T_i} \delta \dot{Q}_i^+ \right] + \dot{Q}_a^+ + \sum_n \left\{ \sum_j [T_a s_j \dot{M}_j^+] - \frac{d}{dt} (T_a S) \right\}_n = T_a \dot{S}^i \geq 0 \\ \sum_k [\dot{E}_{ek}^+] + \sum_i \left[\int \left(1 - \frac{T_a}{T_i} \right) \delta \dot{Q}_i^+ \right] + \sum_n \left\{ \sum_j [(h_{czj} - T_a s_j) \dot{M}_j^+] - \frac{d}{dt} (U_{cz} + P_a V - T_a S) \right\}_n = T_a \dot{S}^i \geq 0 \end{aligned} \quad (4.18)$$

II.5.2 Terminologie et symbolisme

Le bilan exergetique representé par l'expression (4.18) fait apparaitre plusieurs fonctions définies comme suit [13] :

$$* \text{ coénergie totale [J]} \quad J_{cz} = U_{cz} + P_a V - T_a S \quad (4.19)$$

$$* \text{ coénergie totale massique [J/kg]} \quad j_{cz} = u_{cz} + P_a v - T_a s \quad (4.20)$$

$$* \text{ coenthalpie totale [J]} \quad K_{cz} = H_{cz} - T_a S \quad (4.21)$$

$$* \text{ coenthalpie totale massique [J/kg]} \quad k_{cz} = h_{cz} - T_a s \quad (4.22)$$

$$* \text{ facteur de Carnot} \quad \Theta = 1 - \frac{T_a}{T} \quad (4.23)$$

$$* \text{ cotravail – chaleur reçue [J]} \quad E_q^+ = \int \Theta \delta Q^+ \quad (4.24)$$

$$* \text{ copuissance – chaleur reçue [KW]} \quad \dot{E}_q^+ = \int \Theta \delta \dot{Q}^+ \quad (4.25)$$

$$* \text{ cotravail – transformation reçue [J]} \quad E_y^+ = \sum_j \left[\int k_{czj} dM_j^+ \right] - \Delta J_{cz} \quad (4.26)$$

$$* \text{ copuissance – transformation reçue [KW]} \quad \dot{E}_y^+ = \sum_j [k_{czj} \dot{M}_j^+] - \frac{dJ_{cz}}{dt} \quad (4.27)$$

$$* \text{ perte exergetique en énergie [J]} \quad \dot{L} = T_a S^i \geq 0 \quad (4.28)$$

$$* \text{ perte exergetique en puissance [K W]} \quad \dot{L} = T_a \dot{S}^i \geq 0 \quad (4.29)$$

II.6 Coenthalpie

II.6.1 Définition :

La coenthalpie est une fonction d'état extrinsèque. Elle est définie par la relation suivante :

$$K = H - T_a S \quad (4.30)$$

Ou sous forme massique :

$$k = h - T_a s \quad (4.31)$$

Dans laquelle T_a est toujours la valeur moyenne 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 (4.27).

Remarquons que, en vertu de la définition (4.31), 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. 7 Perte exergétique

II.7.1 Définition :

La perte exergétique 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 (4.28), la perte exergétique 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]:

$$\delta L \equiv T_a \delta S^i \geq 0 \quad (4.32)$$

La perte exergétique en énergie L est définie par la relation (4.28) :

$$L \equiv T_a S^i \geq 0 \quad (4.33)$$

La perte exergétique en puissance \dot{L} est définie de la même manière par la relation (4.29) :

$$\dot{L} \equiv T_a \dot{S}^i \geq 0 \quad (4.34)$$

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous présentons les bases des méthodes énergétiques et exergétiques. Nous avons ainsi exposé en détail la formulation mathématique de la théorie d'exergie.

En effectuant une analyse exergétique, il sera possible de quantifier de manière précise la qualité thermodynamique de n'importe quel système énergétique en évaluant les pertes et le rendement exergétique globale. C'est ça l'objectif de ce chapitre pour la centrale thermique à vapeur.

CHAPITRE III

III.1. Introduction :

Ce chapitre concerne principalement l'application de l'analyse exergetique à une centrale thermique à vapeur. L'objectif est d'évaluer les pertes thermodynamiques et le rendement exergetique de chaque organe de la centrale, ainsi que le rendement exergetique.

III.1.1. Analyse exergetique du condenseur :

Le condenseur d'une centrale à vapeur est représenté par la figure (31), dans un régime permanent et les variations des énergies cinétique et potentielle sont négligées.

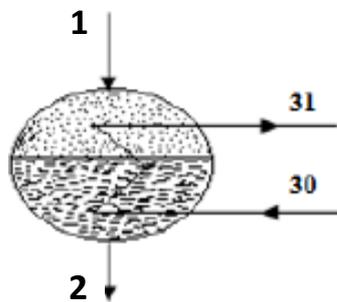


Figure 31 : Schéma d'un condenseur.

Bilan exergetique :

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

Avec :

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

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

\dot{L} : Pertes exergetiques dans le condenseur.

$$\dot{E}_w^+ = \sum_j [K_j \cdot \dot{m}_j^+]$$

Avec :

$(K_j = h_j - T_a \cdot S_j)$: 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}_j^+ : débit masse de la vapeur.

D'où :

$$\dot{E}_{wv}^+ = \dot{m}_1 K_1 - \dot{m}_2 K_2$$

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

La perte exergetique :

Elle est donnée par :

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

Le rendement exergetique :

Le rendement exergetique du condenseur est donné par :

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

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

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

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

La turbine présentée dans le schéma (32) est composée de trois corps. Son régime de fonctionnement est permanent et elle fournit une puissance de travail . Les variations d'énergies cinétique et potentielle sont négligées.

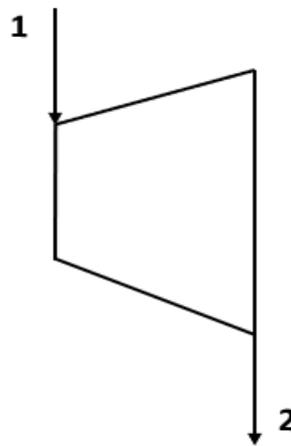


Figure 32 : Schéma d'une turbine à vapeur.

Bilan exergetique :

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

Avec :

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

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

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

La Perte exergetique :

Les pertes exergetique dans la turbine résultent des frottements de la vapeur, de tourbillonnement et des remous dans les aubages, les pertes sont plus nuisibles aux étages.

La perte exergetique totale est :

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

Rendement exergetique : Il s'exprime par :

$$\eta = \frac{\dot{E}_{we}^-}{\dot{E}_w^+}$$

On remplace (1) dans (2) :

$$\eta = 1 - \frac{\dot{L}}{\dot{E}_w^+} \quad (2)$$

III.1.3. Analyse exergetique de la chaudière :

Une chaudière industrielle est présentée en détail par la Figure (33). L'eau liquide est introduite dans la chaudière par le point 1, tandis que les gaz de combustion à la puissance de chaleur sont acheminés vers la chaudière. L'eau est transformée en vapeur surchauffée en passant par le point 2.

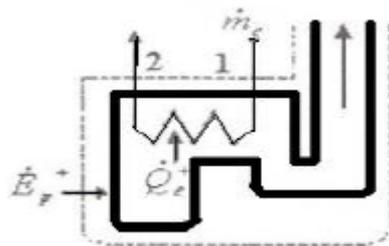


Figure 33 : Schéma d'une chaudière industrielle.

Bilan exergetique :

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

Avec :

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

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_e(K_2 - K_1)$$

\dot{m}_e : est le debit l'eau introduit dans la chaudiere.

K_1, K_2 : sont respectivement les coenthalpies de l'eau à l'entree à la sortie de la chaudiere.

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

$$\dot{E}_{w0}^+ = \Delta K_0 = \dot{m}_B \Delta K_0$$

ΔK_0 : le pouvoir exergetique du combustible B, refere à et .

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

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

La perte exergetique :

$$\dot{L} = \dot{L}_{Ch} + \dot{L}_{ta}^r + \dot{L}_r + \dot{L}_{re} + \dot{L}_d \dot{L}_{te}^c + \dot{L}_{ta} = \dot{m}_B \Delta K_0 + \dot{E}_P^+ - \dot{m}_e(K_2 - K_1)$$

Avec :

\dot{L}_{Ch} : Perte exergetique dues aux reactions chimiques.

\dot{L}_{ta}^r : Perte exergetique dues aux puissances transferees à l'atmosphere par les produits de combustion.

\dot{L}_r : Perte exergetique dues à la relation dans le réseau de combustible.

\dot{L}_{re} : Perte exergetique dues à la dissipation dans le réseau d'eau.

\dot{L}_d : Perte exergetique dues à la diffusion du panache dans l'atmosphère.

\dot{L}_{te}^c : Perte exergetique dues au transfert-chaieur entre le réseau de combustion et le réseau d'eau.

\dot{L}_{ta} : Perte exergetique dues aux puissances chaieur à l'atmosphère par les structures de la chaudière.

Le rendement exergetique :

Le rendement exergetique de la chaudière est :

$$\eta = \frac{\dot{m}_e(k_2 - k_1)}{\dot{m}\Delta K_0 + \dot{E}_p^+}$$

III.2. Application de l'analyse exergetique dans une centrale thermique à vapeur

III.2.1. Description superficielle de la centrale industrielle :

La centrale thermique à vapeur schématisée par la figure (34) à une puissance maximale 380 MW. Elle est composée de :

- Une chaudière.

- Une turbine qui comprend trois corps :

Corps haute pression, corps moyenne pression et corps basse pression.

- Un condenseur

- Trois ballons :

Ballon haute pression (HP), ballon moyenne pression (MP), ballon basse pression (BP).

- Les pompes : pompe d'extraction, pompe de recirculation, pompe alimentaire MP et pompe alimentaire HP.
- Trois soutirages d'eau.

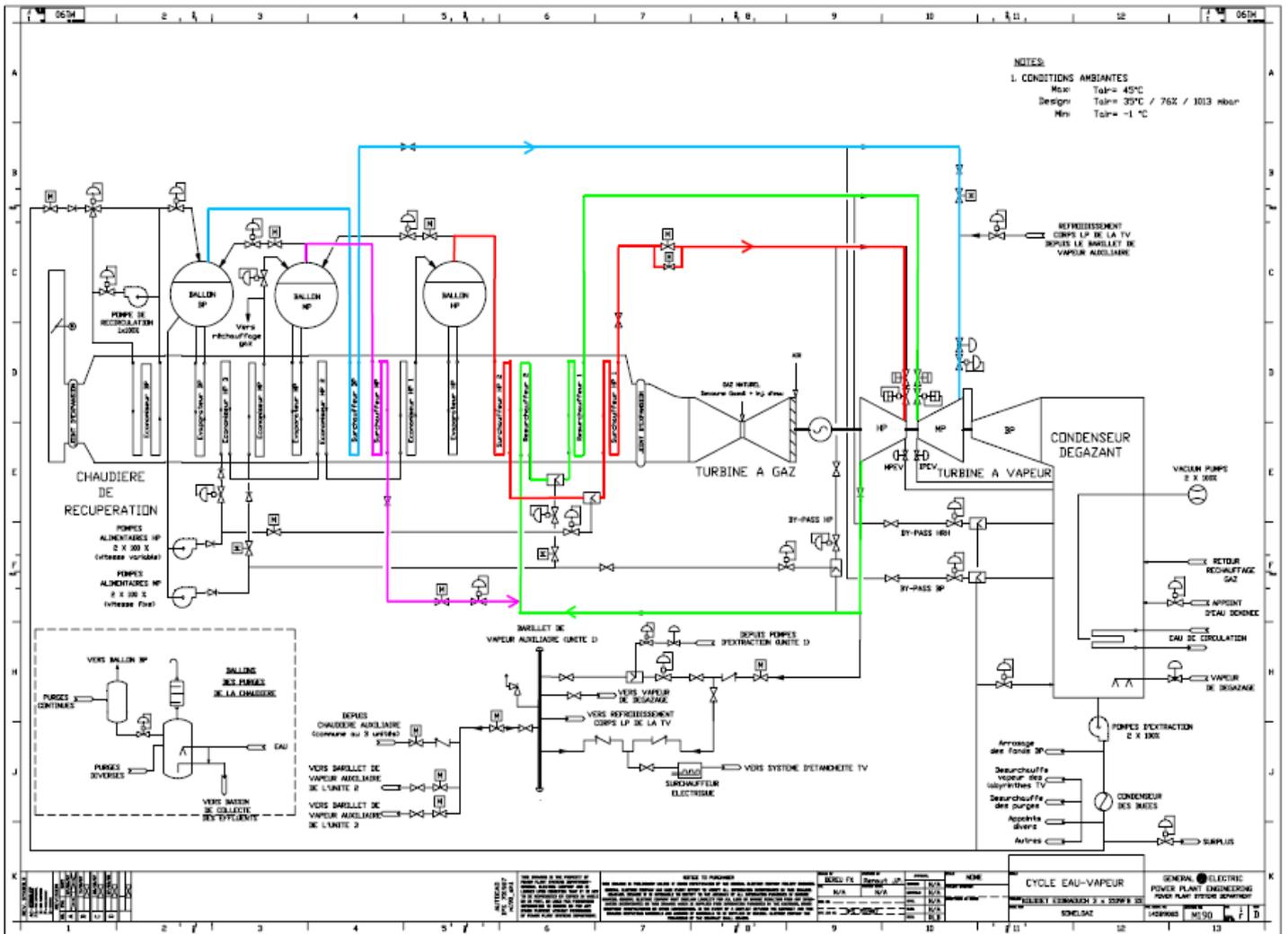


Figure 34 : Schéma de la centrale thermique à vapeur.

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

Constituant	Formule Chimique	% Volumique	Pouvoir Exergetique Δh_{oi} (kJ /k mol)	Pouvoir Exergetique Δh_o (kJ /k mol)
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 1 : La composition volumique du gaz naturel.

III.2.2- Principe de fonctionnement de la centrale objet d'étude :

A l'arrivée de la chaudière, l'eau est divisée en trois parties : une partie se dirige vers le ballon BP, tandis que les deux autres parties alimentent les ballons MP et HP au biais des pompes alimentaires MP et HP respectivement.

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. Plus exactement, les trois portions d'eau pénètrent dans les évaporateurs BP, MP et HP ou elles s'évaporent. Par la suite, les quantités de vapeur produites retournent aux ballons BP, MP et HP dans un état de saturation sèche. Ensuite, les quantités de vapeur saturante sèche (c.-à-d. ne contenant pas de gouttelettes d'eau

liquide) quittent les ballons et passent par les surchauffeurs BP, MP et HP de la chaudière en bénéficiant d'une augmentation d'enthalpie. Après, les quantités de vapeur produites traversent la turbine ou elles se détendent dans les corps BP, MP et HP en abandonnant une grande partie de leur énergies. Il est à souligné que la vapeur qui quitte le surchauffeur MP se rencontre avec la vapeur détendue dans le corps HP de la turbine. En effet, cette quantité va subir une resurchauffe dans les resurchauffeurs 1 et 2 ou elle bénéficie d'un gain d'énergie se caractérisant par une augmentation de son enthalpie.

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 pour y arrivé en fin dans la chaudière et le circuit tourne de nouveau.

Le refroidissement du condenseur 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.

III.2.3. Propriétés thermodynamiques du fluide dans les différents points de la centrale :

Points	Pression (bar)	Enthalpie (KJ /kg)	Température (C°)	Entropie (KJ/ kg.K)	État physique
Entrée condenseur 1	0,058	2500	38,1	8,40	Vap. Sat
Sortie condenseur 2	0,058	160	38,2	0,44	Liq. Sat
3	5	640	150	1,82	Liq. Sat
3'	5	2686	150	6,84	Vap. Sat
4	16	900	213,9	2,28	Liq.sat
4'	16	2770	213,9	6,44	Vap. Sat
5	126	1500	337,5	3,48	Liq.sat
6	126	2606	337,5	5,48	Vap. Sat
7	126	3608	564,9	6,72	Vap. Surch
8	16	3080	337,5	6,88	Vap. Surch
9	16	3602	553	7,60	Vap. Surch
10	5	3376	442	8,84	Vap. Surch
1'	1.70	69.42	16.30	0.24	Liquide
2'	1.20	94.9	22.60	0.33	Liquide
a	0.058	160	38.1	0.44	Liquide
b	1.7	480	38.2	1.44	Liquide
c	5	640	150	1.82	Liquide
d	8	670	157	1.86	Liquide

e	6	650	152.7	1.64	Liquide
f	7	660	154	1.85	Liquide

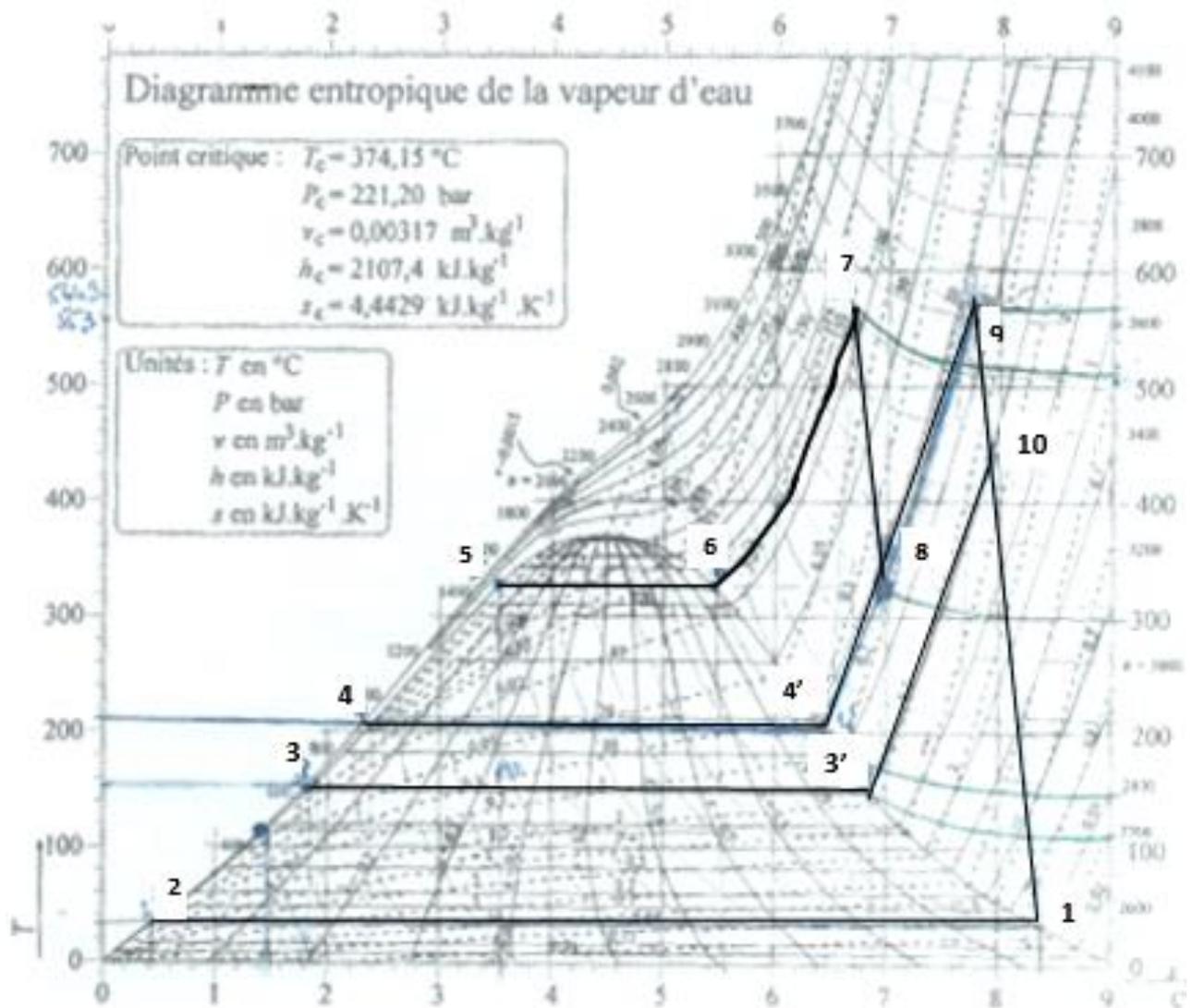
Tableau 2 : Propriétés thermodynamiques.

Vap. Sat : Vapeur saturée.

Liq. Sat : Liquide saturée.

Vap. Surch : Vapeur surchauffée

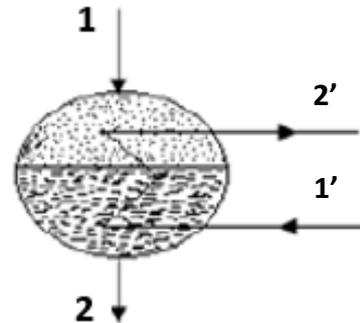
III.2.4. Diagramme (T - S) :



III.2.5. Analyse exergetique du condenseur :

Dans les centrales industrielles, le condenseur est constitué de réseau distinct : le réseau principale (circuit vapeur) et le réseau de réfrigération (circuit eau). Le fluide entrant et sortant du condenseur est caractérisé par :

Points	h(KJ/Kg)	S(KJ/Kg.K)	(Kg/s)
1	2500	8,40	122,22
2	160	0,44	122,22
1'	69,42	0,2462	9800,22
2'	94,9	0,3334	9800,22



Dans tous les calculs, on prend la température ambiante

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

$$\dot{E}_{wv}^+ = \dot{m}_1 K_1 - \dot{m}_2 K_2$$

$$\dot{E}_{wv}^+ = \dot{m}_1 (h_1 - T_a S_1) - \dot{m}_2 (h_2 - T_a S_2)$$

$$\dot{E}_{wv}^+ = 122,22(2500 - 293 \cdot 8,40) - 122,22(160 - 293 \cdot 0,44)$$

$$\dot{E}_{wv}^+ = 943,5384 \text{ KW.}$$

*** La copuissance transformation donnée par le condenseur au niveau du circuit d'eau :**

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_{1'} K_{1'} - \dot{m}_{2'} K_{2'} \quad ; \quad (\dot{m}_{1'} = \dot{m}_{2'})$$

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_{1'} ((h_{1'} - T_a S_{1'}) - \dot{m}_{2'} (h_{2'} - T_a S_{2'}))$$

$$\dot{E}_{we}^- = 9800,22[(94,9 - 293 \cdot 0,3334) + (64,42 - 293 \cdot 0,462)]$$

$$\dot{E}_{we}^- = 682,095312 \text{ KW.}$$

***La perte exergetique :**

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

$$\dot{L}_{co} = 943,5384 - 682,095312$$

$$\dot{L}_{co} = 261,443088 \text{ KW.}$$

***Le rendement exergetique :**

$$\eta = \frac{\dot{E}_{we}^-}{\dot{E}_{wv}^+} = \frac{682,095312}{943,5384} = 0,72\%$$

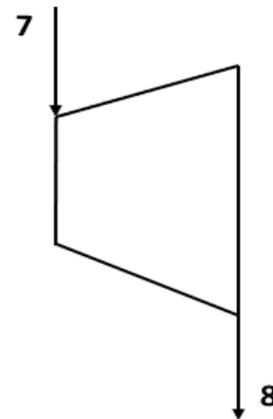
$$\eta \approx 72\%.$$

III.2.6. Analyse exergetique de la turbine :

III.2.6.1. Le corps haute pression (HP) :

Les caracteristiques du fluide à l'entree et à la sortie du corps HP sont :

Point	h(KJ/Kg)	S(KJ/Kg.K)	(Kg/s)
7	3608	6,72	77,77
8	3080	6,88	77,77



*** La copuissance transformation reçue par la turbine au niveau de la vapeur :**

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_7 K_7 - \dot{m}_8 K_8$$

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_7 (h_7 - T_a S_7) - \dot{m}_7 (h_7 - T_a S_7)$$

$$\dot{E}_w^+ = 77,77(3608 - 293 \cdot 6,72) - 77,77(3080 - 293 \cdot 6,88)$$

$$\dot{E}_w^+ = 44708,4176 \text{ KW.}$$

*** La puissance travail donnée par la turbine au niveau du rotor :**

$$\dot{E}^- = \dot{m}_7 (h_7 - h_8)$$

$$\dot{E}^- = 77,77(3608 - 3080)$$

$$\dot{E}^- = 41062,56 \text{ KW.}$$

* La perte exergetique :

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

$$\dot{L} = 44708,4176 - 41062,56$$

$$\dot{L} = 3645,8576 \text{ KW.}$$

*Le rendement exergetique :

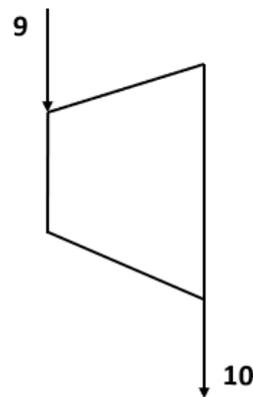
$$\eta = \frac{\dot{E}^-}{\dot{E}_w^+} = \frac{41062,56}{44708,4176} = 0,91$$

$$\eta \approx 91\%.$$

III.2.6.2. Le corps moyenne pression (MP) :

Les caracteristiques du fluide à l'entree et à la sortie du corps MP sont :

Point	h(KJ/Kg)	S(KJ/Kg.K)	(Kg/s)
9	3602	7,60	87,22
10	3376	7,84	87,22



* La puissance transformation reçue par la turbine au niveau de la vapeur :

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_9 K_9 - \dot{m}_{10} K_{10}$$

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_9(h_9 - T_a S_9) - \dot{m}_{10}(h_{10} - T_a S_{10})$$

$$\dot{E}_w^+ = 87,22(3602 - 293 \cdot 7,60) - 87,22(3376 - 293 \cdot 7,84)$$

$$\dot{E}_w^+ = 25845,0304 \text{ KW.}$$

* La puissance travail donnée par la turbine au niveau du rotor :

$$\dot{E}^- = \dot{m}_9 h_9 - \dot{m}_{10} h_{10}$$

$$\dot{E}^- = 87,22 \cdot 3602 - 87,22 \cdot 3376$$

$$\dot{E}^- = 19711,72 \text{ KW.}$$

* La perte exergetique :

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

$$\dot{L} = 25845,0304 - 19711,72$$

$$\dot{L} = 6133,3104 \text{ KW.}$$

*Le rendement exergetique :

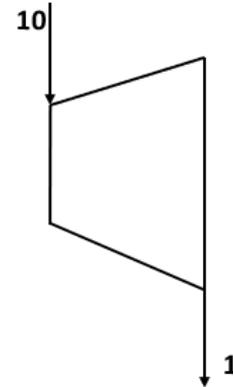
$$\eta = \frac{\dot{E}^-}{\dot{E}_w^+} = \frac{19711,72}{25845,0304} = 0,76$$

$$\eta \approx 76\% .$$

III.2.6.3. Le corps moyenne basse pression (BP) :

Les caractéristiques du fluide à l'entrée et à la sortie du corps BP sont :

Point	h(KJ/Kg)	S(KJ/Kg.K)	(Kg/s)
10	3376	7,84	97,5
1	2500	8,40	97,5



*** La copuissance transformation reçue par la turbine au niveau de la vapeur :**

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_{10}K_{10} - \dot{m}_1K_1$$

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_{10}(h_{10} - T_a S_{10}) - \dot{m}_1(h_1 - T_a S_1)$$

$$\dot{E}_w^+ = 97,5(3376 - 293 \cdot 7,84) - 97,5(2500 - 293 \cdot 8,40)$$

$$\dot{E}_w^+ = 101407,8 \text{ KW.}$$

*** La puissance travail donnée par la turbine au niveau du rotor :**

$$\dot{E}^- = \dot{m}_{10}h_{10} - \dot{m}_1h_1$$

$$\dot{E}^- = 97,5 \cdot 3376 - 97,5 \cdot 2500$$

$$\dot{E}^- = 85410 \text{ KW.}$$

*** La perte exergetique :**

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

$$\dot{L} = 101407,8 - 85410$$

$$\dot{L} = 15997,8 \text{ KW.}$$

***Le rendement exergetique :**

$$\eta = \frac{\dot{E}^-}{\dot{E}_w^+} = \frac{85410}{101407,8} = 0,84$$

$$\eta \approx 84\%.$$

*** La perte exergetique totale dans les trois corps :**

$$\dot{L}_t = \dot{L}_{HP} + \dot{L}_{MP} + \dot{L}_{BP}$$

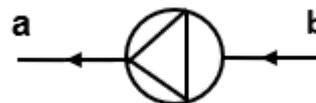
$$\dot{L}_t = 3645,8576 + 6133,3104 + 15997,8$$

$$\dot{L}_t = 25776,968 \text{ KW.}$$

III.2.7. Analyse exergetique de la pompe :

III.2.7.1. La pompe d'extraction :

Point	h(Kj/Kg)	(Kg/s)
a	160	17,77
b	480	17,77



* La puissance consommée :

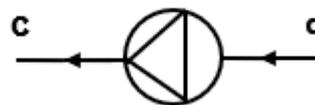
$$\dot{E}_{Pe}^+ = \dot{m}_a(h_a - h_b)$$

$$\dot{E}_{Pe}^+ = 17,77(480 - 160)$$

$$\dot{E}_{Pe}^+ = 5686,4 \text{ KW.}$$

III.2.7.2. La pompe de recirculation :

Point	h(KJ/Kg)	(Kg/s)
c	640	18,88
d	670	18,88



* La puissance consommée :

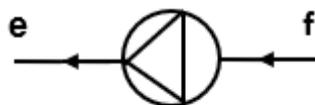
$$\dot{E}_{Pr}^+ = \dot{m}_c(h_c - h_d)$$

$$\dot{E}_{Pr}^+ = 18,88(670 - 640)$$

$$\dot{E}_{Pr}^+ = 566,4 \text{ KW.}$$

III.2.7.3. La pompe alimentaire (MP) :

Point	h(KJ/Kg)	(Kg/s)
e	650	21,027
f	660	21,027



* La puissance consommée :

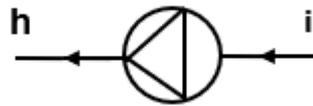
$$\dot{E}_{PM}^+ = \dot{m}_e (h_e - h_f)$$

$$\dot{E}_{PM}^+ = 21,027(660 - 650)$$

$$\dot{E}_{PM}^+ = 210,27 \text{ KW.}$$

III.2.7.4. La pompe alimentaire (HP) :

Point	h(Kj/Kg)	(Kg/s)
h	650	95,83
i	670	95,83



* La puissance consommée :

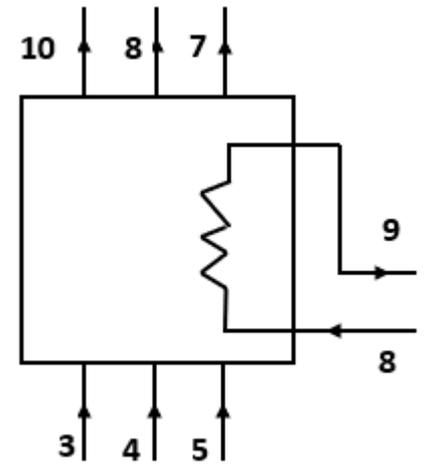
$$\dot{E}_{PH}^+ = \dot{m}_h (h_h - h_i)$$

$$\dot{E}_{PH}^+ = 95,83(670 - 650)$$

$$\dot{E}_{PH}^+ = 1916,6 \text{ KW.}$$

III.2.8. Analyse exergetique de la chaudière :

Point	h(KJ/Kg)	S(KJ/Kg.K)	(Kg/s)
5	1500	3,48	
7	3608	6,72	77,77
4	900	2,28	9,44
8	3080	6,88	87,22
3	640	1,82	10
10	3376	7,84	10,27
9	3602	7,60	87,22



III.2.8.1. Calcul pouvoir exergetique :

En se basant sur les informations dans le tableau 1 et en appliquant la règle de mélange :

$$\Delta K_0 = \sum_i^n X_i \Delta K_{0x}$$

ΔK_0 : Pouvoir exergetique du composant.

X_i : Pourcentage du composant.

$$\Delta K_0 = X_1 \Delta K_{0.1} + X_2 \Delta K_{0.2} + X_3 \Delta K_{0.3} + X_4 \Delta K_{0.4} + X_5 \Delta K_{0.5}$$

$$\Delta K_0 = 0,8350 \cdot 829800 + 0,0690 \cdot 1493200 + 0,021 \cdot 218000 + 0,008 \cdot 2801200 + 0,0023 \cdot 3454100.$$

$$\Delta K_0 = 873616,79 \text{ Kj/Kmol.}$$

III.2.8.2. Détermination du débit molaire \dot{m}_B :

Le débit volumique est donné :

$$\dot{m}_V = 3220 \text{ m}^3/\text{h.}$$

$$\dot{m}_B = \frac{\dot{m}_V}{V} \quad (V : \text{Volume molaire}).$$

$$\dot{m}_B = \frac{3220 \cdot 10^3}{3600 \cdot 22,413 \cdot 10^3}$$

$$\dot{m}_B = 0,486 \text{ Kmol/S.}$$

III.2.8.3. La copuissance transformation du combustible :

$$\dot{E}_w^+ = \dot{m}_B \Delta K_0 = 0,486 \cdot 873616,79$$

$$\dot{E}_w^+ = 424577,75 \text{ KW.}$$

III.2.8.4. La copuissance transformation reçu par l'eau :

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_7 K_7 - \dot{m}_5 K_5$$

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_7 (h_7 - T_a S_7) - \dot{m}_5 (h_5 - T_a S_5)$$

$$\dot{E}_{we}^- = 77,77(3608 - 293 \cdot 6,72) - 81,38(1500 - 293 \cdot 3,48)$$

$$\dot{E}_{we}^- = 88376,444 \text{ KW.}$$

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_8 K_8 - \dot{m}_4 K_4$$

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_8 (h_8 - T_a S_8) - \dot{m}_4 (h_4 - T_a S_4)$$

$$\dot{E}_{we}^- = 87,22(3080 - 293 \cdot 6,88) - 9,44(900 - 293 \cdot 2,28)$$

$$\dot{E}_{we}^- = 90626,3328 \text{ KW.}$$

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_{10}K_{10} - \dot{m}_3K_3$$

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_{10}(h_{10} - T_a S_{10}) - \dot{m}_3(h_3 - T_a S_3)$$

$$\dot{E}_{we}^- = 10,27(3376 - 293 \cdot 7,84) - 10(640 - 293 \cdot 1,82)$$

$$\dot{E}_{we}^- = 10012,6976 \text{ KW.}$$

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_9K_9 - \dot{m}_8K_8$$

$$\dot{E}_{we}^- = \dot{m}_9(h_9 - T_a S_9) - \dot{m}_8(h_8 - T_a S_8)$$

$$\dot{E}_{we}^- = 87,22(3602 - 293 \cdot 7,60) - 87,22(3080 - 293 \cdot 6,88)$$

$$\dot{E}_{we}^- = 27128,9088 \text{ KW.}$$

$$\dot{E}_{we}^- = 88376,444 + 90626,3328 + 10012,6976 + 27128,9088$$

$$\dot{E}_{we}^- = 216144,3832 \text{ KW.}$$

III.2.8.5. La perte exergetique dans la chaudière :

$$\dot{L}_c = \dot{E}_w^+ + \dot{E}_{pe}^+ - \dot{E}_{we}^-$$

\dot{E}_w^+ : copuissance transformation du combustible.

\dot{E}_{pe}^+ : puissance des moteurs électriques.

\dot{E}_{we}^- : copuissance transformation reçu par l'eau.

$$\dot{L}_c = 424577,75 + 500 - 216144,3832$$

$$\dot{L}_c = 208933,3668 \text{ KW.}$$

III.2.8.6. Le rendement exergetique :

$$\eta = \frac{\dot{E}_{we}^-}{\dot{E}_w^+ + \dot{E}_{pe}^+} = \frac{216144,3832}{424577,75 + 500} = 0,50$$

$$\eta \approx 50\%.$$

III.2.9. Bilan de la centrale.

III.2.9.1. Rendement exergetique :

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

\dot{L} : Perte exergetique total.

\dot{E}_w^+ : copuissance transformation du combustible.

\dot{E}_p^+ : Puissance électrique total des moteurs dans la centrale.

$$\dot{L}_{\text{totale}} = \dot{L}_{co} + \dot{L}_t + \dot{L}_c$$

\dot{L}_{co} : Perte totale de condenseur.

\dot{L}_t : Perte totale de la turbine.

\dot{L}_c : Perte totale de la chaudière.

$$\dot{L}_{\text{totale}} = 261,443088 + 25776,968 + 208933,3668$$

$$\dot{L}_{\text{totale}} = 234971,7779 \text{ KW.}$$

$$E_p^+ = 500 \text{ KW.}$$

$$E_w^+ = 424577,75 \text{ KW.}$$

$$\eta = 1 - \frac{\dot{L}}{E_w^+ + E_p^+} = \frac{234971,7779}{424577,75 + 500} = 0,55$$

$$\eta \approx 55 \text{ \%}.$$

III.2.9.2. Calcule du taux de répartition des pertes dans la centrale :

Condenseur :
$$\tau = \frac{\dot{L}_{co}}{\dot{L}_{totale}} = \frac{261,443088}{234971,7779} = 0,0096243179.$$

Turbine :
$$\tau = \frac{\dot{L}_t}{\dot{L}_{totale}} = \frac{25776,968}{234971,7779} = 0,1097024001.$$

Chaudière :
$$\tau = \frac{\dot{L}_c}{\dot{L}_{totale}} = \frac{208933,3668}{234971,7779} = 0,8891849424.$$

III.2.10. Tableaux récapitulatifs des calculs :

Elément	Grandeur	Symbole	Valeur [KW]	Perte exergetique [KW]	Rendement exergetique %
Condenseur	-Copuissance transformation reçue		943,5384	261,095312	72
	-Copuissance transformation donnée		682,095312		
Corps (HP)	-Copuissance transformation reçue		44708,4176	3645,8576	91
	-puissance transformation fournie		41063,56		
Corps (MP)	-Copuissance transformation reçue		25845,0304	6133,310	76
	-puissance transformation fournie		19711,72		
Corps (BP)	-Copuissance transformation reçue		101407,8	15997,8	84
	-puissance transformation fournie				
Bilan Turbine	-Copuissance transformation reçue		171961,248	25776,968	85
	-puissance transformation fournie		146184,28		
Pompe d'extraction	-Puissance consommée		5686,4	/	/
Pompe de recirculation	-Puissance consommée		566,4	/	/
Pompe alimentaire MP	-Puissance consommée		210,27	/	/
Pompe alimentaire BP	-Puissance consommée		1916,6	/	/
Bilan de la centrale	/	/	/		44

III.2.11. Interpretation des resultats :

- ✓ L'analyse exergetique menee sur une centrale thermique à vapeur revele que les pertes exergetiques dans la chaudiere representent la quasi-totalite des pertes generatees par la centrale. Ces pertes sont principalement causees par des reactions chimiques, le transfert d'energie des produits de combustion (tels que les fumees) à l'atmosphere, ainsi que la perte de chaleur due à une chute de temperature.
- ✓ Au niveau de la turbine, on constate que la vapeur y entre en tournant lentement, ce qui perturbe et dissipe le processus. Par consequent, le rendement est inferieur à 1 (.
- ✓ Le rendement exergetique de l'installation est faible, et ce resultat a une explication, due à l'etat d'irreversibilite qui provoque et cree des pertes au niveau de la centrale.

Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons d'abord appris à utiliser la methode exergetique. Ensuite, nous avons applique cette methode avec succes à la centrale thermique à vapeur. Nous avons pu evaluer les pertes exergetiques et le rendement exergetique global.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Les centrales énergétiques sont considérées comme l'un des moyens les plus efficaces pour le développement industriel de tout pays. Cette étude modeste porte sur l'analyse exergetique d'une centrale thermique à vapeur.

L'objectif de cette étude était de mesurer la qualité thermodynamique de l'installation examinée en calculant les pertes exergetiques de chaque composant de la centrale thermique, ainsi que le rendement exergetique global.

L'analyse exergetique est un outil très utile pour évaluer la qualité thermodynamique de tout système, qu'il s'agisse d'un élément, d'un appareil, d'une machine ou d'une installation. Elle permet de diagnostiquer l'état thermodynamique du système étudié en identifiant toutes les imperfections liées à la séquence.

L'analyse exergetique offre de nombreux avantages, notamment en mettant l'accent sur les défauts thermodynamiques d'un système et en évaluant avec précision les pertes thermodynamiques de tout équipement énergétique. Ces pertes sont directement liées aux irréversibilités dans les transformations thermodynamiques du système. Les professionnels cherchent à minimiser les opérations irréversibles en éliminant en premier lieu les irréversibilités les plus évidentes.

Grâce à l'analyse exergetique réalisée sur la centrale thermique sélectionnée, nous avons pu appliquer cette méthode avec succès et mettre en évidence son importance. En effet, nous avons été en mesure d'évaluer les pertes thermodynamiques pour chaque composant et de calculer le rendement exergetique global de l'installation à vapeur étudiée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques :

- [1] Energie électrique, Traite d'électricité. V. XII. M. Aguet et al., 1990.
- [2] DE R. THIBAUT A, " mécanique appliquée TOME 1" De BOECK MAISON D'EDITION S.A. BRUXELLES édition Mines Nancy-Ecole d'ingénieurs.
- [3] ENS : A. HAMANE, "Production de l'Energie Electrique " 2020/2021.
- [4] L'uranium, le combustible nucléaire, EDF, vidéo sur l'utilisation du combustible dans la centrale
- [5] ROBYNS Benoît, DAVIGNY Arnaud, FRANÇOIS Bruno, HENNETON Antoine, SPROOTEN Jonathan, "Production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables" Edition : Lavoisier, 2012.
- [6] « Les énergies en question, l'énergie hydraulique » de Ian GRAHAM, édition GAMMA – Ecole active.
- [7] WILDI Théodore, "Electrotechnique", Editions : ESKA - 2^{ème} édition, 1991.
- [8] JOLY Jean-Pierre," SOLAIRE THERMIQUE : LES TECHNOLOGIES ET LEURS TRAJECTOIRES « Edition copyright,2018.
- [9] Stéphane Christian Noah Yann S," QU'EST CE QU'UNE EOLIENNE ?"
- [10] BESLIN Guy et MULTON Bernard, " Production d'électricité éolienne : de la caractérisation du gisement éolien aux technologies d'aérogénérateurs", Encyclopédie de l'énergie, Article N. 088, 2016.
- [11] A. Mirecki. Thèse Doctorat (Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance) de l'institut national polytechnique de Toulouse (2005).
- [12] Quentin MOREL (N08/E&F),"l'hydroélectricité Bases et présentation générale"
- [13] "Production d'électricité d'origine thermique", note d'information, EDF, 2015.
- [14] Guide COMMENT ÇA MARCHE P R O D U C T I O N D ' É L E C T R I C I T É édition Ontario Power Génération Inc., 2010
- [16] Jean Pierre Hutin, "La maintenance des centrales nucléaires" edition.lavoisier.fr.
- [17] ADEME, 2003, Guide pour le montage de projets de petite hydroélectricité
- [18] JOLY Jean-Pierre," SOLAIRE THERMIQUE : LES TECHNOLOGIES ET LEURS TRAJECTOIRES "Edition copyright,2018".

- [19] C. N. EBEY, "Etude d'une éolienne lente pour l'entraînement d'une pompe à piston simple effet ", Université Kinshasa, 2005.
- [20] Éditeur responsable : Luminus – Boulevard Roi Albert II, 7 – 1210 Bruxelles
Imprimé sur du papier FSC – Édition 2022, "Les centrales thermiques de Luminus"
- [21] Chelbi Moncef El Islem, " Etude exergetique d'une centrale thermique à vapeur" mémoire de fin d'études, 2016/2017.
- [22]https://www.maisondelenergie.fr/sites/maisondelenergie.fr/files/centrale_nucleaire_de_4_eme_generation_0.pdf
- [23]<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/l-uranium-le-combustible-nucleaire>
- [24]http://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/bensalem_ahmed/files/production_energie_electrique_l2_elt.pdf
- [25]<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Centrale-solaire.html>
- [26]<http://energies2demain.com/eau/hydraulique/les-barrageshydroelectriques/>
- [27]<https://www.edf.fr>
- [28]<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/l-uranium-le-combustible-nucleaire>
- [29]<https://local.attac.org/attac06/IMG/pdf/EnergieNucleaire.pdf>
- [30]<http://elearning.univ-jijel.dz/course/view.php?id=3814>
- [31] Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, Thermodynamique : une approche pragmatique, 2^{ème} édition, Mc Graw Hill Education, 2014.
- [32] Lucien Borel, Daniel Favrat, "Thermodynamique et énergétique, Tome 1 de l'exergie à l'énergie", 2005 éditions, entièrement revue et augmentée presses polytechniques et universitaires romandes.