

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie mécanique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : Energétique  
Thème

*Etude d'une turbine à vapeur dans une centrale thermique*

Présenté Par :

1) Mr. KERMANE RIAD

Devant le jury composé de :

Dr. T. Nehari

UAT.B. B (Ain Temouchent)

Président

Dr. Berrezoug.I

UAT.B. B (Ain Temouchent)

Examinatrice

Dr. Guendouze.B

UAT.B. B (Ain Temouchent)

Encadrant

*Année universitaire 2020/2021*

# Remerciement

*Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la patience de mener à terme ce présent travail.*

*Puis je remercie ma famille, et sur tous mes parents, qui m'a auront permis de poursuivre mes études jusqu'à aujourd'hui et qui m'a aidé moralement et financièrement.*

*Je remercie mon encadreur M' « G. Bouhelal » pour son encadrement.*

*J'exprime mes sincères remerciements à mes professeurs « Bouafia Farida » et « Tayeb Nehari » et tous les professeurs qui on m'a aidé*

*Je remercie mes collègue de promo mécanique M.Oussama ,M.dounia H.achwak, M.moustefa et mes amies qui on me donne l'aide dans cette mémoire Boumediene Kawther , ma sœur Moulessouiga Fatima .*

*Enfin je remercier tous ceux qui de loin ou de près m'ont aidé et encouragé.*

# *Dédicaces*

*Je dédie cette mémoire à :*

*Ma chère famille.*

*Mon père ma Mère, mon Frère, mes trois sœurs et toute la famille Kermane.*

*À mes amis K. Nadjib, B.Islem, M.Fatima , K.Fatna , etc.*

*A tous les professeurs qui m'ont appris et qui m'ont aidé*

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

## **Résumé :**

L'énergie est le moteur de l'humaine aujourd'hui. Sans énergie, l'humaine ne peut pas vivre dans un état facile. Cette utilisation a prouvé que la question de l'énergie est devenue très importante. En revanche, les coûts de production d'énergie sont très élevés, ce qui nécessite une bonne connaissance des moyens de sa production.

Dans cette thèse, on a présenté une méthode de génération d'énergie électrique, qui est la turbine à vapeur dans une centrale thermique. Cette machine utilise de la vapeur d'eau dans sa fonction et afin de convertir l'énergie thermique contenue dans cette vapeur en énergie mécanique pour faire fonctionner le générateur. On a étudié cette machine, ses types, son principe de fonctionnement et ses composants, et on a pris l'exemple d'une centrale thermique pour produire de l'électricité, La compagnie d'électricité TERGA. J'ai créé un algorithme dans le logiciel Matlab pour calculer l'efficacité de la turbine et étudié l'effet des changements de température et de pression sur l'efficacité de la turbine.

**Mots Clés :** l'énergie électrique, l'énergie mécanique, la turbine à vapeur, une centrale thermique, logiciel Matlab, le générateur.

## **Abstract:**

Energy is the engine of humans today. Without energy, humans cannot live in an easy state. This use has proven that the issue of energy has become very important. On the other hand, the costs of energy production are very high, which requires a good knowledge of the means of its production.

In this thesis, we presented a method of generating electrical energy, which is the steam turbine in a thermal power plant. This machine uses water vapor in its function and in order to convert the thermal energy contained in this vapor into mechanical energy to operate the generator. We studied this machine, its types, its operating principle and its components, and we took the example of a thermal power station to produce electricity, the electricity company TERGA. I created an algorithm in MATLAB software to calculate turbine efficiency and studied the effect of temperature and pressure changes on turbine efficiency.

**Keywords:** Electrical energy, Mechanical energy, steam turbine, thermal power plant, MATLAB software, generator.

## ملخص:

الطاقة هي محرك الإنسان اليوم بدون طاقة، لا يمكن للبشر أن يعيشوا في حالة سهلة. لقد اثبت هذا الاستخدام أن قضية الطاقة أصبحت مهمة للغاية. من ناحية أخرى، فإن تكاليف إنتاج الطاقة مرتفعة للغاية، مما يتطلب معرفة جيدة بوسائل إنتاجها.

في هذه الأطروحة قدمنا طريقة لتوليد الطاقة الكهربائية وهي التوربينات البخارية في محطة توليد الطاقة الحرارية. تستخدم هذه الآلة بخار الماء في وظيفتها ومن أجل تحويل الطاقة الحرارية الموجودة في هذا البخار إلى طاقة ميكانيكية لتشغيل المولد. درسنا هذه الآلة وأنواعها ومبدأ عملها ومكوناتها، واخذنا مثال محطة الطاقة الحرارية لإنتاج الكهرباء، شركة الكهرباء تاركة. لقد انشأت خوارزمية في برنامج ماتلاب لحساب كفاءة التوربينات ودراسة تأثير تغيرات درجة الحرارة والضغط على هذه الكفاءة.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة الكهربائية، الطاقة الميكانيكية، التوربينات البخارية، محطة الطاقة الحرارية، برنامج ماتلاب، المولد.

# *Tables des Matières*

## Table des Matières :

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	III
Table des matières.....	IV
Liste des Figures.....	V
Liste des Tableaux.....	VI
Abréviations et nomenclatures.....	VII
Introduction générale.....	1

### **Chapitre I: Généralité sur les machines à combustion externe**

Introduction :.....	3
I.1. Définition du Moteur à combustion externe :.....	4
I.2. Types des moteurs à combustion externe :.....	4
I.2.1. Machine à vapeur :.....	4
I.2.2. Locomotive sans foyer :.....	5
I.2.3. Moteur Stirling :.....	5
I.2.4. Moteur Ericsson :.....	7
I.2.5. La Turbine :.....	8
I.2.5.1. Turbine à gaz :.....	9
I.2.5.2. Turbine à vapeur :.....	11
I.2.5.2.1. Historique :.....	11
I.2.5.2.2. Description :.....	13
I.2.5.2.3. Les principaux composants de la turbine à vapeur :.....	13
I.2.5.2.3.1. La pompe :.....	13
I.2.5.2.3.2. La chaudière (générateur de vapeur) :.....	14
I.2.5.2.3.3. Le condenseur :.....	14
I.2.5.2.3.4. La turbine :.....	15
I.2.5.3.4. Classification des turbines à vapeur :.....	16
I.2.5.3.4.1. Selon l'utilisation :.....	16
I.2.5.3.4.2. Selon la direction d'écoulement de vapeur :.....	17
I.2.5.3.4.3. Selon le nombre d'étages de rotor :.....	17
I.2.5.3.4.4. Selon le mode d'action :.....	18

I.2.5.3.4.5. Selon le mode de construction :	18
I.2.5.3.5. Principe de fonctionnement :	19
I.2.5.3.6. Transfert d'énergie aux rotors :	21
I.2.5.3.7. Domaines d'applications :	22
I.2.5.3.8. Central thermique :	22

## **Chapitre II: les turbines à vapeur**

Introduction :	24
II.1. Recherche bibliographique :	25
II.2. Les cycles thermodynamiques de la turbine à vapeur (centrale thermique à vapeur) :....	26
II.2.1. Cycle de Rankine :	26
II.2.2. Cycle de Hirn :	27
II.2.3. Cycle de Hirn avec resurchauffe :	28
II.2.4. Cycle à soutirage :	29
II.2.5. Cycle à régénération :	30
II.2.6. Cycle de Rankine réel :	30
II.3. Les opérations d'amélioration du cycle de Rankine :	31
II.3.1. Effet de la surchauffe :	31
II.3.2. Effet de la pression maximale :	32
II.4. Centrales thermiques à vapeur :	32
II.4.1. Les organes principaux du central thermique :	33
II.4.1.1. La turbine à vapeur :	33
II.4.1.2. Principe de fonctionnement :	34
II.4.1.3. Description du T.V :	35
II.4.1.3.1. La distribution :	35
II.4.1.3.2. Les diaphragmes :	35
II.4.1.3.3. Le rotor :	36
II.4.1.3.4. L'arbre :	36
II.4.1.3.5. Les roues :	36
II.4.1.3.6. Les paliers :	37
II.4.1.3.7. Les étanchéités :	38
II.4.1.3.7.1. Etanchéité pour la vapeur :	38
II.4.1.3.7.2. Etanchéité pour l'huile :	40
II.4.1.3.8. Graissage :	40
II.4.2. La chaudière :	40

II.4.2.1. Eléments constituant une chaudière : .....	41
II.4.2.1.1. Chambre de combustion : .....	41
II.4.2.1.2. Brûleurs : .....	41
II.4.2.1.3. Economiseur : .....	41
II.4.2.1.4. Réservoir (Ballon supérieur) : .....	42
II.4.2.1.5. Surchauffeurs : .....	42
II.4.2.1.6. Réchauffeur d'air : .....	42
II.4.2.2. Les différents types des chaudières : .....	43
II.4.2.2.1. Chaudières à tubes de fumée : .....	43
II.4.2.2.2. Chaudière à tubes d'eau : .....	43
II.4.3. Une chaudière remplit trois fonctions successives : .....	44
II.4.3.1. Paramètres d'exploitation d'une chaudière : .....	45
II.4.3.2. Première méthode : .....	45
II.4.3.3. Deuxième méthode : .....	47
II.4.3.3.1. Pertes par fumées : .....	48
II.4.3.3.2. Pertes par parois : .....	49
II.4.3.3.3. Rendement de la combustion : .....	49
II.4.3.3.4. Rendement global : .....	49
II.4.3.4. Le transfert de chaleur dans les chaudières à vapeur : .....	49
II.4.3.4.1. Rayonnement dans une chaudière à vapeur : .....	50
II.4.3.4.2. Convection dans une chaudière à vapeur : .....	50
II.4.3.4.3. Conduction dans les chaudières à vapeur : .....	50
II.4.4. Le condenseur : .....	51
II.4.4.1. Classification des condenseurs : .....	51
II.4.4.2. Principe de fonctionnement : .....	53
II.4.4.3. Bilan thermique : .....	54
II.4.5. Les pompes : .....	55
II.4.5.1. Caractéristiques: .....	56
II.4.5.1.1. La cylindrée : .....	56
II.4.5.1.2. Le débit : .....	56
II.4.5.1.3. La différence de pression : .....	56
II.4.5.1.4. Puissance mécanique (ou théorique) : .....	56
II.4.5.1.5. Puissance hydraulique (ou réelle) : .....	57
II.4.5.1.6. Le rendement volumétrique : .....	57

II.4.5.1.7. Le rendement mécanique :	57
II.4.5.1.8. Le rendement global :	57
II.4.5.2. Le rôle des pompes dans la centrale thermique à vapeur :	57
II.4.5.3. Les types des pompes:	58
II.4.5.3.1. Pompe d'alimentation de chaudière :	58
II.4.5.3.2. Pompe à condensat :	58
II.4.5.3.3. Pompe de circulation d'eau de chaudière :	58
II.4.5.3.4. Pompe de surpression :	58
II.4.5.3.5. Pompe de circulation d'eau :	59
II.5. Les différents états de l'eau et de la vapeur :	59
II.5.1. Vapeur d'eau saturée:	60
II.5.1.1. Formule de Regnault :	61
II.5.1.2. Avantages d'utiliser la vapeur d'eau saturée comme source de chaleur :	62
II.5.2. Vapeur humide :	62
II.5.2.1. Le teneur en vapeur :	62
II.5.2.2. Enthalpie spécifique de vapeur humide :	63
II.5.2.3. Entropie spécifique de vapeur humide :	63
II.5.2.4. Volume spécifique de vapeur humide :	64
II.5.3. Vapeur surchauffée:	64
II.5.3.1. Avantages d'utiliser la vapeur surchauffée pour entraîner une turbine:	65
II.5.3.2. Désavantages d'utiliser la vapeur surchauffée pour chauffer :	65
II.5.4. Eau supercritique :	66
II.5.5. Eau liquide :	66
II.6. Maintenance de la turbine à vapeur :	68

### **Chapitre III: L'étude de cas**

III.1. Description générale du centrale thermique :	71
III.2. Turbine à vapeur :	71
III.3. GROUPES PRINCIPAUX DE LA TURBINE A VAPEUR :	72
III.3.1. Turbine HP :	72
III.3.2. Turbine MP :	72
III.3.3. Turbine BP :	73
III.3.4. Condenseur principal :	73
III.3.5. Réservoir d'eau d'alimentation :	73
III.3.6. Condenseur de vapeur de barrage :	73

III.3.7. Bloc des auxiliaires : .....	73
III.3.8. Alternateur : .....	74
III.4. Cycle d'installation du central thermique combiné CC : .....	75
III.4.1. Explication du cycle : .....	75
III.5. Description de système : .....	77
III.5.1. Hypothèses simplificatrices : .....	77
III.5.2. Modélisation de Cycle : .....	77
III.5.3. Interprétation des résultats : .....	82
Conclusion : .....	86
Conclusion Générale : .....	89
Références Bibliographique .....	91

## Liste des figures :

### Chapitre I

<b>Figure I.01</b> : Machine à vapeur	05
<b>Figure I.02</b> : Locomotive sans foyer	05
<b>Figure I.03</b> : Différente configuration d'un moteur de Stirling.	06
<b>Figure I.04</b> : Diagramme de Clapeyron du cycle de Stirling.	07
<b>Figure I.05</b> : Cycle d'Ericsson	08
<b>Figure I.06</b> : Une Turbine.	09
<b>Figure I.07</b> : Turbine à gaz.	10
<b>Figure I.08</b> : Schématisation Turbine à gaz. (Cycle de Brayton)	10
<b>Figure I.09</b> : Turbine à vapeur.	11
<b>Figure I.10</b> : La turbine et son inventeur « Charles Algernon Parsons »	12
<b>Figure I.11</b> : la turbine et son inventeur Gustaf Laval.	12
<b>Figure I.12</b> : Les composantes d'une turbine à vapeur.	13
<b>Figure I.13</b> : représentation d'une pompe centrifuge multicellulaire.	14
<b>Figure I.14</b> : représentation d'une chaudière.	14
<b>Figure I.15</b> : représentation d'un condenseur.	15
<b>Figure I.16</b> : représentation d'un rotor.	15
<b>Figure I.17</b> : Demi-coupe d'un stator.	16
<b>Figure I.18</b> : Schéma d'une turbine à condensation et à contre-pression.	16
<b>Figure I.19</b> : Turbine axial et radial	17
<b>Figure I.20</b> : Turbines mono étagée et multi étagée.	17
<b>Figure I.21</b> : Turbine à action et à réaction.	18
<b>Figure I.22</b> : Turbine à un corps et à plusieurs corps	19
<b>Figure I.23</b> : La pompe comprime le liquide.	19
<b>Figure I.24</b> : L'apport de chaleur à la chaudière.	20
<b>Figure I.25</b> : Chute de pression et de température de la vapeur lorsque la turbine en absorbe L'énergie.	20
<b>Figure I.26</b> : Utilisation du condenseur pour transformer la vapeur en état liquide.	21
<b>Figure I.27</b> : Variations de vitesse et d'enthalpie à travers les étages de rotor et de stator d'une turbine à vapeur typique.	21

## Chapitre II

<b>Figure II.01</b> : Schéma du processus coté TV et diagramme T.H de Rankine.	27
<b>Figure II.02</b> : Schématisation de cycle de Hirn.	28
<b>Figure II.03</b> : Schéma de cycle de Hirn à resurchauffe.	28
<b>Figure II.04</b> : Schéma d'une installation à vapeur soutirée	29
<b>Figure II.05</b> : Le cycle à régénération avec réchauffeur à surface	30
<b>Figure II.06</b> : Diagramme (T, S) de cycle de turbine à vapeur réel et idéal.	31
<b>Figure II.07</b> : diagramme T-S avec surchauffe	31
<b>Figure II.08</b> : Effet de la pression maximale.	32
<b>Figure II.09</b> : Installation du central a thermique à vapeur.	33
<b>Figure II.10</b> : Conception de la turbine à vapeur.	34
<b>Figure II.11</b> : Distributeur.	35
<b>Figure II.12</b> : Rotor.	36
<b>Figure II.13</b> : Les roues et les ailettes.	36
<b>Figure II.14</b> : L'ancrage en forme de pied de sapin et l'ancrage en Té.	37
<b>Figure II.15</b> : Composent d'une ailette	37
<b>Figure II.16</b> : Coussinets lisses, à patins ou à billes	38
<b>Figure II.17</b> : Patins avec sonde	38
<b>Figure II.18</b> : Les anneaux carbonés.	39
<b>Figure II.19</b> : Les labyrinthes	39
<b>Figure II.20</b> : Schématisation d'une chaudière.	40
<b>Figure II.21</b> : Un brûleur.	41
<b>Figure II.22</b> : Le ballon supérieur	42
<b>Figure II.23</b> : principe de fonctionnement d'une chaudière à tubes de fumée	43
<b>Figure II.24</b> : Chaudière à tubes d'eau.	44
<b>Figure II.25</b> : Bilan Energétique de la chaudière.	45
<b>Figure II.26</b> : Pertes d'une chaudière lorsque son brûleur est en fonctionnement.	48
<b>Figure II.27</b> : Distribution de la température avec flux constant	51
<b>Figure II.28</b> : Schématisation de condenseur par surface.	52
<b>Figure II.29</b> : Schématisation de condenseurs par mélange.	53
<b>Figure II.30</b> : Présentation d'une pompe.	55
<b>Figure II.31</b> : Les différents états de l'eau et de la vapeur	59

<b>Figure II.32</b> : Vapeur d'eau saturée.	60
<b>Figure II.33</b> : Vapeur surchauffée	64
<b>Figure II.34</b> : Maintenance de turbine à vapeur	68

### **Chapitre III**

<b>Figure III.01</b> : Schéma de d'une unité cycle combiné a single shaft.	71
<b>Figure III.02</b> : Turbine à vapeur ALSTOM.	72
<b>Figure III.03</b> : Alternateur type 50WT21H-120	74
<b>Figure III.04</b> : Cycle à vapeur dans une installation TGV `a 3 niveaux de pression	75
<b>Figure III.05</b> : Cycle à vapeur dans une installation TGV à Trois niveaux de pression	76
<b>Figure III.06</b> : Cycle à vapeur étudié.	77
<b>Figure III.07</b> : Variation de Rendement par rapport à la température.	83
<b>Figure III.08</b> : Variation de Rendement par rapport à la pression.	84
<b>Figure III.09</b> : Variation du rendement par rapport la pression.	85

## Liste des Tableaux :

### Chapitre II

<b>Tableau II.01</b> : Différence entre chaudière tube d'eau et à tube de fumée	44
<b>Tableau II.02</b> : Avantages et inconvénient de chaudière tube d'eau et à tube de fumé	45
<b>Tableau II.03</b> : Valeurs approximatives des coefficients d'échange global	54
<b>Tableau II.04</b> : un extrait de table de vapeur.	61
<b>Tableau II.05</b> : Avantages d'utiliser la vapeur d'eau saturée comme source de chaleur.	62
<b>Tableau II.06</b> : Désavantages d'utiliser la vapeur surchauffée pour chauffer.	66

### Chapitre III

<b>Tableau III.01</b> : Les coefficients de l'équation de la pression d'équilibre.	78
<b>Tableau III.02</b> : Les coefficients de l'équation de l'enthalpie de liquide saturé.	79
<b>Tableau III.03</b> : Les coefficients de l'équation de volume massique de liquide saturé.	79
<b>Tableau III.04</b> : Les coefficients de l'équation de l'entropie de vapeur saturé.	81
<b>Tableau III.05</b> : Les données de départ.	82
<b>Tableau III.06</b> : Donnée thermodynamique du point du cycle Rankine avec resurchauffe.	83
<b>Tableau III.07</b> : la variation de rendement en fonction de la température d'entrée à la turbine	84
<b>Tableau III.08</b> : la variation de rendement en fonction de la pression d'entrée à la turbine.	85
<b>Tableau III.09</b> : la variation de rendement en fonction de la pression de sortie à la première turbine.	86

## *Abréviations et nomoclatures*

<b>Symbole</b>	<b>Description</b>	<b>Unité</b>
T	Température.	[°K], [°C].
$p$	La pression.	[MPa].
P	Puissance.	[KW].
h	Enthalpie spécifique du fluide.	[KJ/kg]
$v$	Le volume massique	[m <sup>3</sup> /Kg]
$\dot{Q}m$	Le débit massique.	[kg/s]
w	Travail.	[KJ].
$w_{T_{Hp}}$	Le travail réel du la turbine haute pression.	[kJ/kg]
$w_{T_{Bp}}$	Le travail réel du la turbine basse pression.	[kJ/kg]
$w_{ut}$	Le travail utile.	[kJ/kg]
$w_{Pompe}$	Le travail de la pompe.	[kJ/kg]
Q	L'énergie fournie.	[kJ/kg]
$\eta$	Rendement.	[%]
$P_{TV}$	Puissance mécanique de la turbine à vapeur	[W]
S	Entropie spécifique du fluide.	[kJ/kg]

<i>Symbole Grecques</i>	<i>Description.</i>
$\eta$	Rendement.

<i>Abréviations</i>	<i>Description</i>
<i>CC</i>	Cycle combiné.
<i>TGV</i>	Turbine gaz vapeur
<i>TV</i>	Turbine à vapeur.
<i>SKT</i>	Shariket Kehraba Terga

<i>Indices</i>	<i>Description</i>
$T_{Hp}$	Turbine haute pression.
$T_{Bp}$	Turbine basse pression.
<i>méc</i>	Mécanique.
<i>T</i>	Turbine.
<i>HP</i>	Haute pression.
<i>MP</i>	Moyenne pression.
<i>BP</i>	Basse pression.

# *Introduction Générale*

## **Introduction générale**

L'énergie électrique est l'une des énergies les plus importantes inventées par l'homme. Cette énergie peut être considérée comme l'un des fondements sur lesquels repose la vie humaine aujourd'hui, car il l'utilise dans tous les domaines de sa vie, que ce soit dans sa vie personnelle, dans les études, au travail, dans la communication, etc.

L'énergie électrique n'est pas une énergie primaire, c'est-à-dire qu'elle nécessite une autre énergie ou d'autres énergies pour la produire.

L'une des méthodes les plus importantes utilisées aujourd'hui dans le monde pour produire de l'électricité est les centrales thermiques qui reposent sur le principe de la turbine à vapeur.

Les turbines à vapeur sont des machines à combustion externe de la famille des turbomachines.

Cette machine se caractérise par sa bonne efficacité, car cette machine utilise la vapeur d'eau comme source d'énergie, de sorte que l'eau s'évapore à des températures et des pressions élevées en utilisant la chaudière et cette vapeur pénètre dans la turbine et fait tourner ses ailettes, et ce mécanisme est ce qui s'appelle la conversion de l'énergie chimique ou thermique en énergie mécanique de sorte qu'il en résulte une rotation Arbre de turbine et générateur électrique.

Notre objectif dans ce travail est l'étudier les turbines à vapeur dans une centrale thermique et leur fonctionnement et quels sont les facteurs affectant leur efficacité.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le chapitre I : présente une introduction sur les systèmes de production d'énergie mécanique principalement les moteurs à combustion externe, il détaille les cycles, les principes de fonctionnement et leur performance.

Le chapitre II : montré en détaillé les différents cycles du central thermique et qui concerne la turbine à vapeur sa fonctionnement, types, composent, etc.

Le chapitre III : Une étude de cas sur les turbines à vapeur utilisant la simulation dans le programme Matlab pour calculer leur efficacité et les paramètres influe sur son rendement.

Enfin, le travail se termine par une conclusion générale.

*Chapitre I :*

*Généralité sur les*

*machines à combustion*

*Externe*

**Introduction :**

Dans la terre, il existe plusieurs sources d'énergie, avec l'avancement scientifique l'être humain découvre qu'il peut exploiter cette énergie de différentes manières grâce à des machines.

Une machine est un produit mécanique capable d'utiliser une source d'énergie communément disponible pour effectuer par elle-même, sous la conduite ou non d'un opérateur, une ou plusieurs tâches spécifiques, en exerçant un travail mécanique sur un outil, la charge à déplacer ou la matière à façonner. Une machine peut être fixe (machine-outil, machine à laver, etc.) ou mobile (locomotive, Tondeuse à ; gazon, etc.).

Il y'a plusieurs types des machines, dans ce chapitre, on va présenter les machines thermique motrice plus connue dans le secteur de transfert d'énergie thermique en l'énergie mécanique sous le nom de « Moteur thermique ».

**I.1. Définition du Moteur à combustion externe :**

Les moteurs à énergie externe ou moteur à combustion externe désigne un ensemble de machines thermiques où l'énergie est fournie par deux sources de température externes (une chaude et une froide) et convertie en énergie mécanique par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur subissant un cycle thermodynamique fermé. Aucune combustion n'a lieu à l'intérieur du moteur et le fluide demeure confiné dans le moteur. Les plus connus sont : la machine à vapeur, la turbine à vapeur et le moteur Stirling.

La source chaude peut être sans combustion à proximité du moteur : soleil, moteur thermique ou centrale nucléaire. [1]

**I.2. Types des moteurs à combustion externe :****I.2.1. Machine à vapeur :**

C'est un moteur qui utilise comme source d'énergie la chaleur emmagasinée dans la vapeur d'eau. L'eau liquide rendue à l'état gazeux après avoir été portée à ébullition par une source d'énergie thermique (souvent du charbon), provenant le plus souvent d'une combustion. La machine à vapeur est le point de départ de la révolution industrielle. La machine à vapeur a été souvent utilisée pour les bateaux à vapeur, les locomotives à vapeur.

La machine à vapeur fonctionne, comme son nom l'indique, grâce à la vapeur d'eau. On chauffe l'eau dans une chaudière alimentée avec du charbon que l'on brûle. La vapeur s'accumule alors dans un compartiment dans lequel se trouve un piston mobile. Toute cette vapeur exerce une pression sur le piston qui se déplace. Ce piston est relié à une roue par une bielle. Ainsi, le mouvement du piston peut actionner la roue.

La chaudière d'une machine à vapeur s'appelle le bouilleur, l'ensemble des tuyaux le tuyautage et celui qui entretient le feu, le chauffeur. La vapeur d'eau est dirigée grâce à des tuyaux vers un cylindre où peut se déplacer un piston. Le piston est relié à une roue grâce à une bielle. Le déplacement du piston, dans un aller et retour continu provoqué par l'admission de la vapeur sur les deux faces du piston, permet à la bielle de mettre en action la roue. Si cette roue est reliée, par des courroies ou des chaînes, à une machine, celle-ci se met en mouvement.

La machine à vapeur est aussi améliorée, et déposée sur les premières voitures à vapeur très pratique pour les personnes de cette époque. [2]

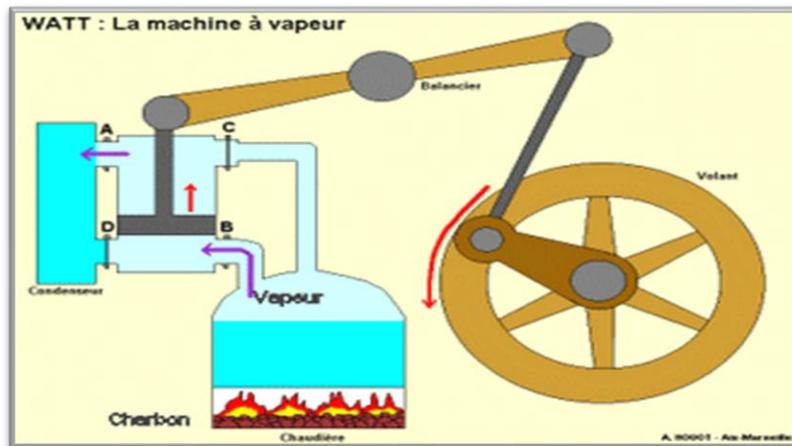


Figure I.01 : Machine à vapeur [1]

### I.2.2. Locomotive sans foyer :

Une locomotive sans foyer est une locomotive à vapeur sans chaudière. Au lieu de cela, elle dispose d'un accumulateur de vapeur, un réservoir rempli d'eau bouillante, qui peut être chargé avec de la vapeur provenant d'une chaudière stationnaire. La locomotive fonctionne alors sur la réserve de vapeur stockée jusqu'à ce qu'une nouvelle charge soit nécessaire. Une locomotive à vapeur est un engin moteur pour les chemins de fer, mu par une machine à vapeur. [3]

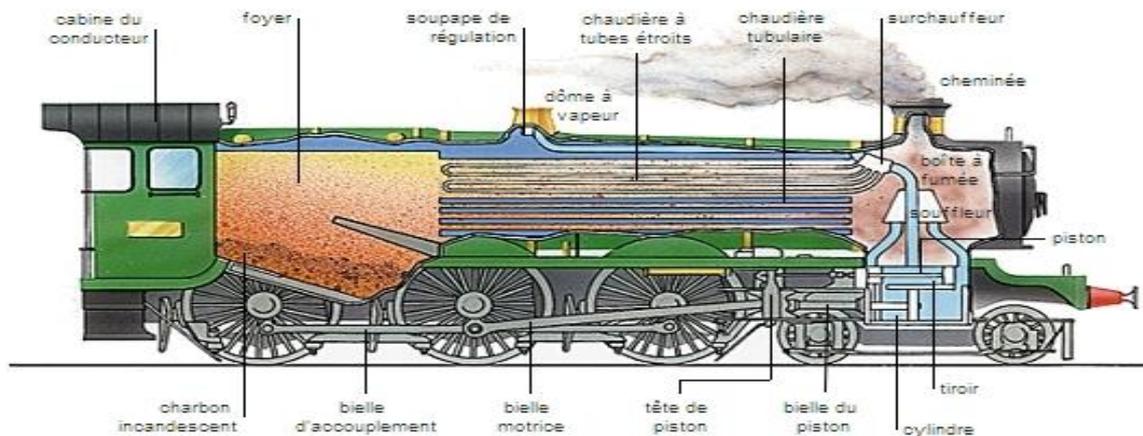


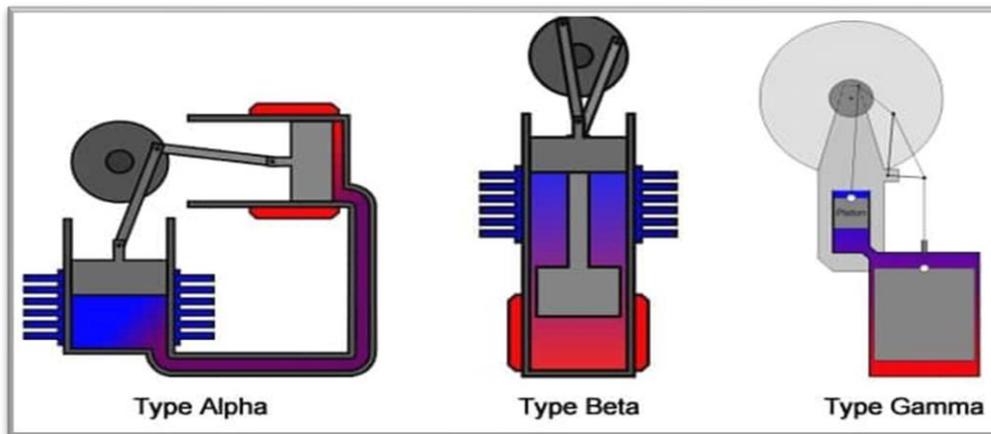
Figure I.02 : Locomotive sans foyer [2]

### I.2.3. Moteur Stirling :

Le moteur Stirling à gaz est un moteur thermique alternatif à combustion externe qui opère selon un cycle fermé avec régénération. Son rendement théorique est égal à celui de Carnot, ce qui explique la fascination qu'il exerce sur de nombreux chercheurs et ingénieurs.

Le premier brevet concernant ce type de moteur a été déposé en 1816 par l'écossais Robert Stirling, qui cherchait à développer un appareil moins dangereux que les moteurs à vapeur.

Comme, au XIXe siècle, son fluide technique était de l'air, c'est sous le nom de moteur à air chaud qu'il a rapidement connu un grand succès. Ses applications étaient très nombreuses, industrielles comme le pompage de l'eau aussi bien que domestiques comme la ventilation des locaux. Depuis le début du XXe siècle, les moteurs alternatifs à combustion interne et le développement de la motorisation électrique ont progressivement détrôné les moteurs Stirling, qui ne sont aujourd'hui que très peu employés. [4]



**Figure I.03 : Différente configuration d'un moteur de Stirling. [1]**

Le cycle de Stirling correspond à un processus cyclique réversible. Ce cycle est constitué de deux isothermes et de deux isochores. Comme la montré la figure I-04, les 4 phases du moteur Stirling est représenté dans un diagramme pression-volume. Plus précisément, il exprime la pression du gaz (sur l'axe des ordonnées) en fonction du volume occupé par ce même gaz (sur l'axe des abscisses). Le cycle est parcouru dans le sens CDABC.

- Un chauffage isochore (à volume constant) ( $1 \rightarrow 2$ ) : Le brûleur (la source chaude) cède de l'énergie thermique, causant la hausse de la pression et la température du gaz.
- Une détente isotherme (à température constante) ( $2 \rightarrow 3$ ) : Le volume s'accroît alors que la pression diminue mais la température reste constante. C'est pendant cette transformation que l'énergie motrice est produite.
- Un refroidissement isochore ( $3 \rightarrow 4$ ) : L'eau projetée (la source froide) récupère de l'énergie thermique. La température et la pression diminuent pendant cette phase.

- Une compression isotherme (4 → 1) : La pression du gaz augmente au fur et à mesure que son volume diminue. On doit fournir de l'énergie mécanique au gaz pendant cette période.

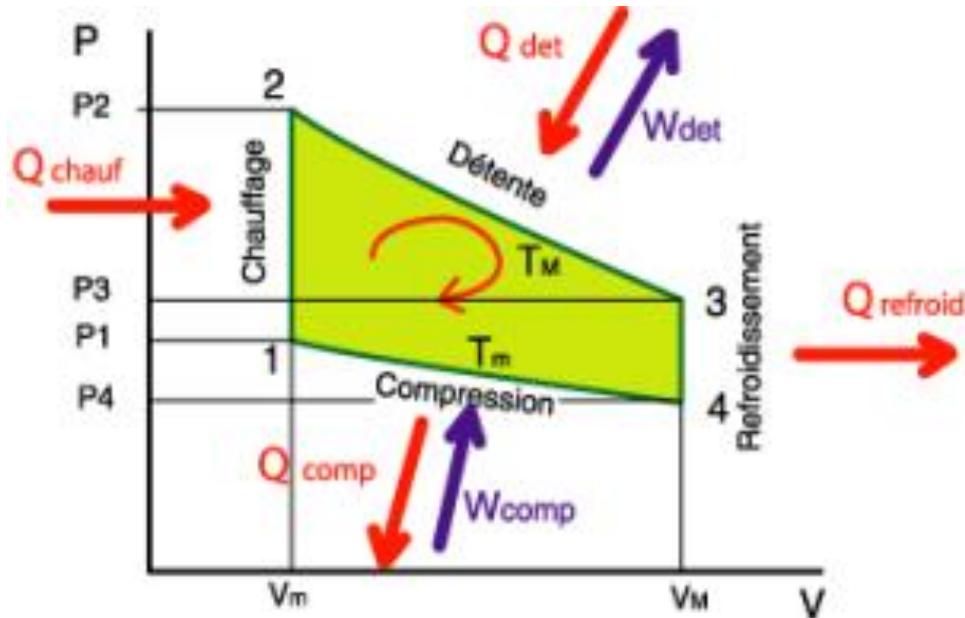


Figure I.04: Diagramme de Clapeyron du cycle de Stirling. [4]

On remarque dès lors que la détente et la compression s'effectuent à température constante, alors que le chauffage et le refroidissement s'effectuent à volume constant. L'aire colorée en vert représente le travail accompli pendant un cycle. [5]

#### I.2.4. Moteur Ericsson :

Le moteur Ericsson fait partie de la famille des moteurs chauffants. Le rôle de ces moteurs est de convertir l'énergie thermique en énergie mécanique. Pour ça, Le moteur Ericsson est un moteur alternatif avec entrée de chaleur externe, chambre de pression et d'expansion séparée, dispositif de récupération et fluides de travail à gaz monphasés. Il fonctionne selon le cycle thermodynamique Joule. Dans un contexte énergétique global caractérisé par une crise liée à l'épuisement progressif des ressources fossiles et des problèmes environnementaux, il est impératif de développer de nouveaux systèmes pour produire une énergie « propre » à faible coût. Le moteur Ericsson s'est avéré être une solution technologique appropriée pour convertir l'énergie solaire en électricité et pour les applications de cogénération fractionnée. [6]

La figure I.05 représente les éléments principaux de ce moteur ainsi les différents processus de cycle d'Ericsson contiennent : C : cylindre de compression ; E : cylindre de détente ; H : réchauffeur ; R : régénérateur ; K : refroidisseur.

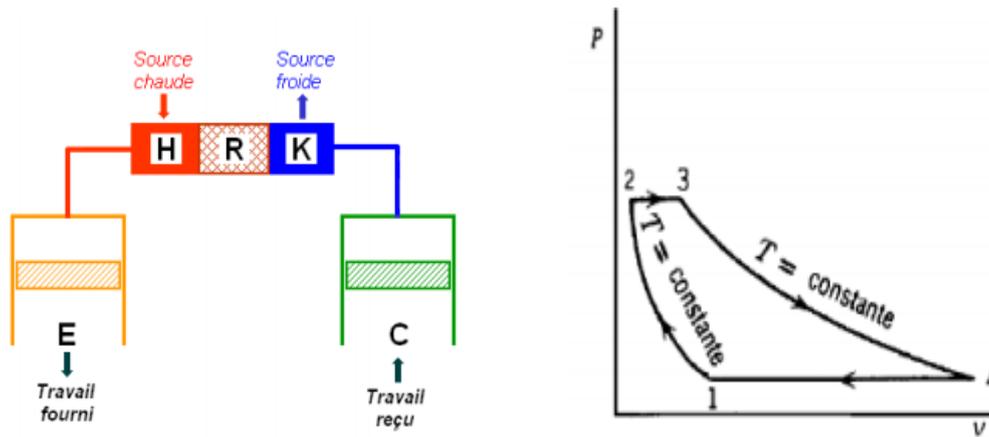


Figure I.05 : Cycle d'Ericsson [.5]

Ce cycle est constitué de deux isothermes et de deux isobares. Il est parcouru dans le sens 12341 suivant :

- Transformation Isotherme 1-2.
- Transformation isobare 2-3.
- Transformation Isotherme 3-4.
- Transformation isobare 4-1.

### I.2.5. La Turbine :

Une turbine est une machine tournante qui récupère l'énergie cinétique d'un fluide pour mettre en mouvement l'arbre de transmission. La turbine est constituée :

- D'une partie mobile comprenant un arbre sur lequel sont fixées les roues à aubes du compresseur et de la turbine.
- D'une partie fixe couramment appelée "carter de la turbine" et dans lequel on retrouve les chambres de combustion, les déflecteurs pour correctement diriger le fluide sur les aubes de la turbine.

La turbine montée sur l'arbre de transmission est mise en rotation par la force exercée sur le fluide (liquide, gaz) sur les aubes. Cette action engendre une diminution de la pression du fluide ou détente. Dans le cas de la cogénération, l'arbre est couplé à un alternateur pour la production d'électricité.

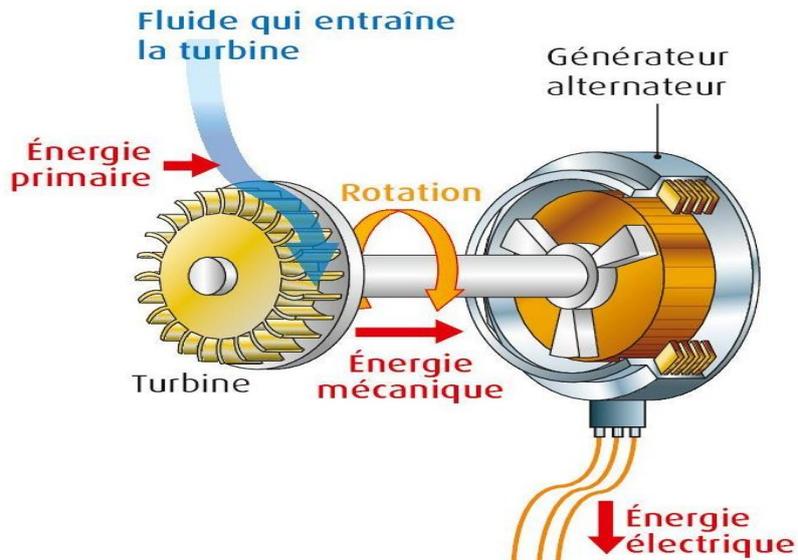


Figure I.06 : Une Turbine. [.6]

La turbine est une machine qui nécessite un fonctionnement idéalement en continu. Ce type d'équipement présente, entre autres comme avantage, de demander moins d'entretien que les moteurs. [7]

### I.2.5.1. Turbine à gaz :

Une turbine à gaz (dénomination historique, abrégée en TAC), appelée aussi turbine à combustion (TAC) ou parfois turbine à gaz de combustion (dénomination la plus précise), est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique sous la forme de la rotation d'un arbre, directement à partir de l'énergie cinétique des gaz produits par la combustion d'un hydrocarbure (fioul, gaz combustible...) qui subissent une détente dans une turbine. Le comburant, le plus souvent de l'air ambiant, est généralement comprimé avant de pénétrer dans la chambre de combustion, en utilisant un compresseur rotatif entraîné par le même arbre que la turbine.

Le mot « gaz » dans l'ancienne dénomination « turbine à gaz » (longtemps la plus employée) ne signifie pas que la machine ne peut brûler que du combustible gazeux, mais fait référence au caractère gazeux des produits de combustion, par opposition aux turbines à vapeur dans lesquelles le fluide moteur (de la vapeur d'eau) se condense en liquide.

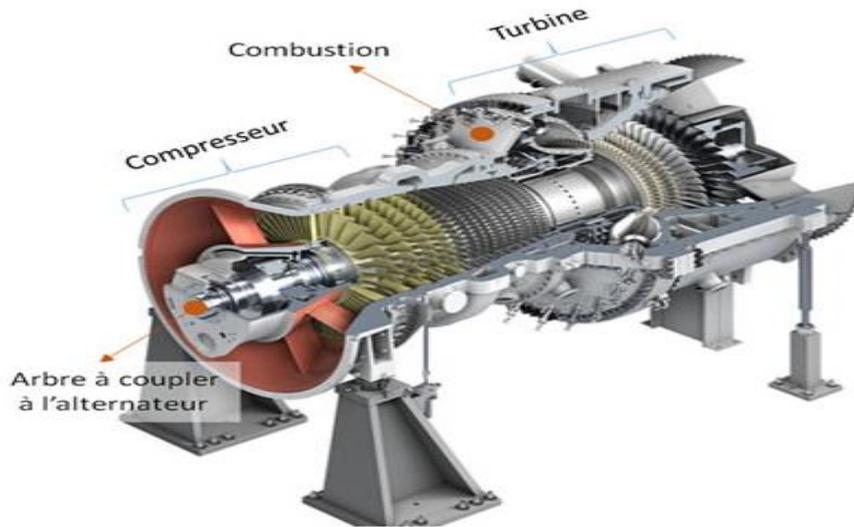


Figure I.07 : Turbine à gaz. [.7]

La turbine à gaz est un moteur thermique réalisant les différentes phases de son cycle thermodynamique dans une succession d'organes traversés par un fluide moteur gazeux en écoulement continu. C'est une différence fondamentale par rapport aux moteurs à pistons qui réalisent une succession temporelle des phases dans un même organe (généralement un cylindre).

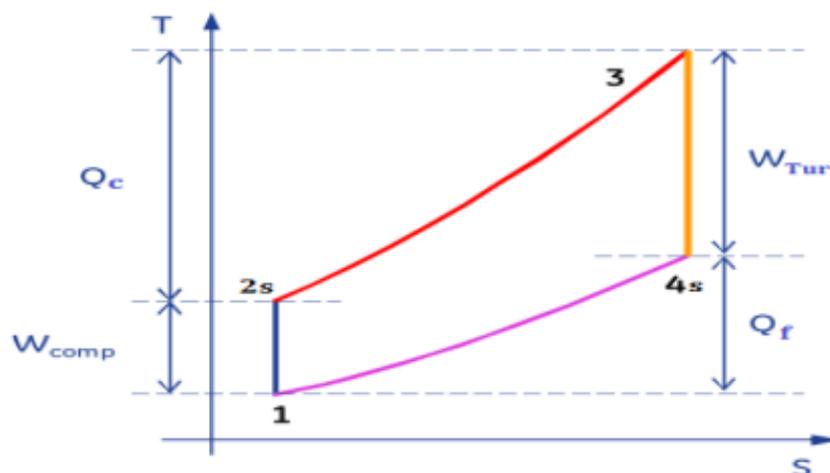


Figure I.08 : Schématisation Turbine à gaz. (Cycle de Brayton) [.8]

Dans sa forme la plus simple, la turbine à gaz fonctionne selon le cycle dit de Brayton comprenant successivement et schématiquement (figure I-08) :

- Une compression adiabatique qui consomme de l'énergie mécanique (1-2s) ;
- Un chauffage isobare comme pour un moteur Diesel (2s-3) ;

- Une détente adiabatique jusqu'à la pression ambiante qui produit de l'énergie mécanique (3-4s) ;
- Un refroidissement isobare (4s-1). [8]

### I.2.5.2. Turbine à vapeur :

Une turbine à vapeur utilise, comme son nom l'indique, la vapeur comme fluide de propulsion. Elle est produite, par exemple, à partir d'une chaudière ou disponible en sortie d'un processus industriel. La vapeur produite à haute pression est injectée à l'entrée de la turbine.

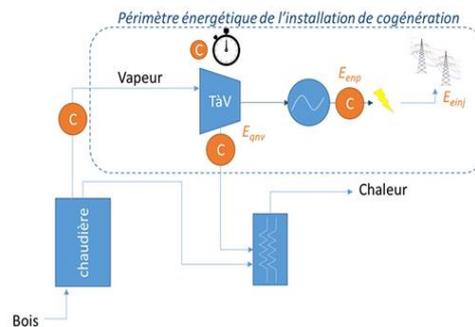
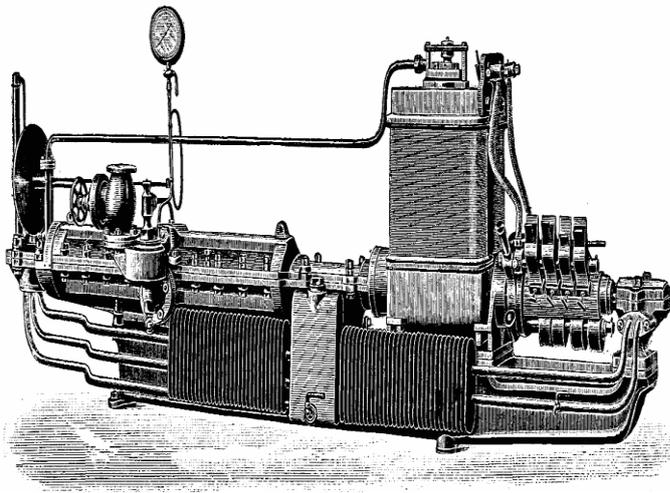


Figure I.09 : Turbine à vapeur. [9]

À ce niveau, elle subit une série de détente au travers de plusieurs étages de roue à aubes, en générant l'énergie mécanique nécessaire à mettre l'arbre en rotation. Le schéma ci-dessus montre une turbine vapeur alimentée par une chaudière. La chaleur résiduelle comprise dans la vapeur basse pression (BP) et dans les quelques pourcents de condensats non récupérés par la chaudière vapeur, peut servir à alimenter un système de chauffage (principe de récupération de la chaleur fatale). [7]

#### I.2.5.2.1. Historique :

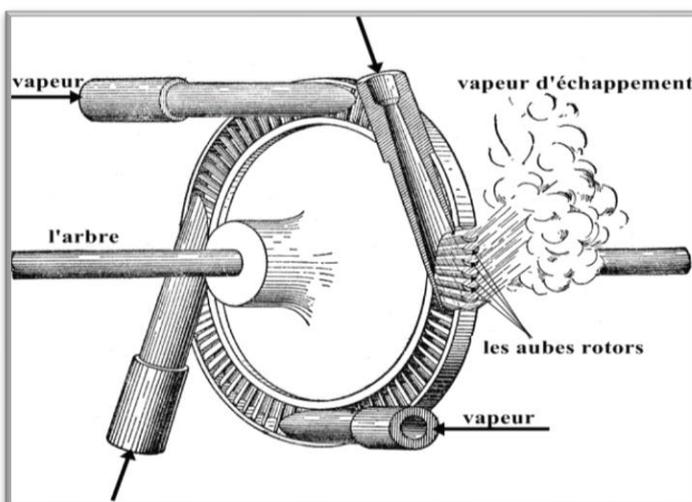
La première turbine à vapeur est décrite au 1er siècle par le mathématicien grec Héron d'Alexandrie en Égypte romaine en 1551, et en Égypte ottomane "Taqi al-Din" décrit une turbine à vapeur dont l'application pratique est la rotation d'une broche. Les turbines à vapeur ont également été décrites par l'italien "Giovanni Branca" en 1629 et par "John Wilkins" en Angleterre en 1648. Les dispositifs décrits par "Taqi al-Din et Wilkins" sont aujourd'hui connus comme des tourne broches à vapeur. [1]



**Figure I.10: La turbine et son inventeur « Charles Algernon Parsons » [10]**

En 1884 La turbine à vapeur moderne du type à réaction fut inventée par "Sir Charles Parsons", Où le premier modèle était connecté à une dynamo qui généra 7.5 kW d'électricité. Et a évolué au fil des ans et la taille des génératrices a augmenté jusqu'à des unités de 50 000 kW de capacité. [1]

Et pour travailler efficacement avec la vapeur. "Gustaf de Laval" Inventé la turbine de Laval qui accélérât la vapeur d'eau à pleine vitesse avant de l'envoyer vers des aubes de turbine. Cette turbine est plus simple, moins coûteuse et n'a pas besoin d'être aussi résistante à la pression, mais est moins efficace. Et en 1896 "Auguste Rateau" développa une turbine à pression à impulsion sur la base du principe de Laval, obtint un brevet américain en 1903. [1]



**Figure I.11 : la turbine et son inventaire Gustaf Laval. [11]**

Aussi, La turbine Brown-Curtis, de type à impulsion, fut développée dans les années 1900, en collaboration avec John Brown & Company. Elle fut utilisée dans des moteurs John Brown de navires marchands et de guerre. [1]

### I.2.5.2.2. Description :

Une turbine est constituée d'un rotor comprenant un arbre sur lequel sont fixées des aubes et, d'un stator constitué d'un carter portant des déflecteurs fixes, généralement constitué de deux parties assemblées selon un plan axial. Elle comprend en outre un tore d'admission segmenté et un divergent d'échappement dirigé vers le condenseur. La fonction des déflecteurs fixes est d'assurer tout ou partie de la détente en formant un réseau de tuyères et de modifier la direction de l'écoulement sortant de l'étage précédent.

Une turbine à vapeur comprend un ou plusieurs étages assurant chacun deux fonctions :

- La détente de la vapeur qui correspond à la conversion de l'énergie potentielle en énergie cinétique,
- La conversion de l'énergie cinétique en couple de rotation de la machine par le biais des aubages mobiles. [9]

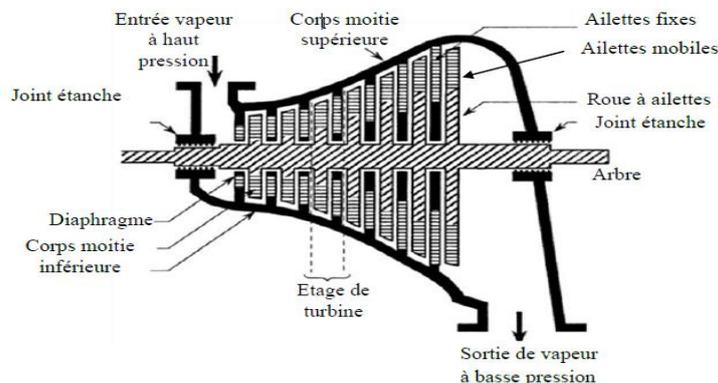


Figure I.12: Les composants d'une turbine à vapeur [12]

### I.2.5.2.3. Les principaux composants de la turbine à vapeur :

Les installations industrielles à vapeur sont en générale constituées :

#### I.2.5.2.3.1. La pompe :

C'est une pompe centrifuge multicellulaire. Elle comprend un corps d'aspiration, un corps de refoulement et un certain nombre d'étages ou de cellules assemblées par des tirants.

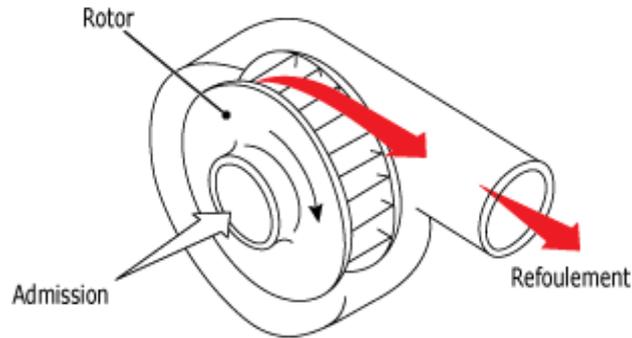


Figure I.13 : représentation d'une pompe centrifuge multicellulaire. [13]

Son rôle consiste à :

- Alimenter la chaudière à vapeur.
- Elever la pression de l'eau liquide. [10]

#### I.2.5.2.3.2. La chaudière (générateur de vapeur) :

Représente la source chaude de l'installation. Elle a pour rôle la production de la vapeur nécessaire au fonctionnement de l'installation. [11]



Figure I.14 : représentation d'une chaudière. [14]

#### I.2.5.2.3.3. Le condenseur :

Le condenseur est un échangeur de chaleur avec des milliers de tubes dans lesquels l'eau du circuit de refroidissement circule. Son rôle consiste à :

- Condenser la vapeur provenant directement de la turbine.
- Maintenir un niveau assez bas à la sortie de la turbine. [11]

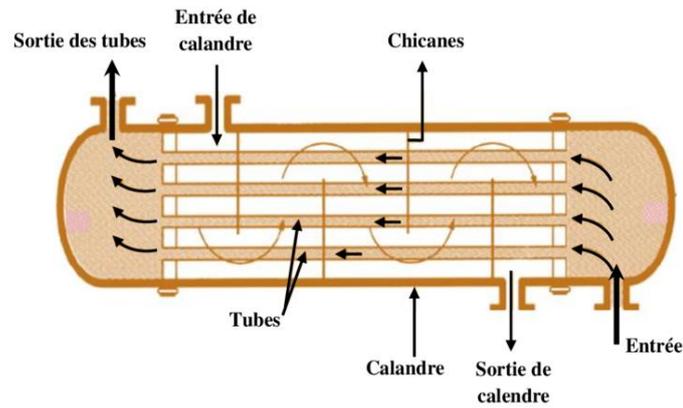


Figure I.15 : représentation d'un condenseur. [.15]

#### I.2.5.2.3.4. La turbine :

Est une installation de deux parties principales (le rotor et le stator) : [12].

- **Le rotor** : Il comprend un arbre et des roues à aubes. A une de ses extrémités, l'arbre est muni d'un tourillon et d'un accouplement à dilatation. A l'autre extrémité, l'arbre est muni d'un second tourillon et de cannelures reprenant la poussée axiale. Le rotor convertit l'énergie enthalpique et cinétique de la vapeur en travail sur l'arbre.

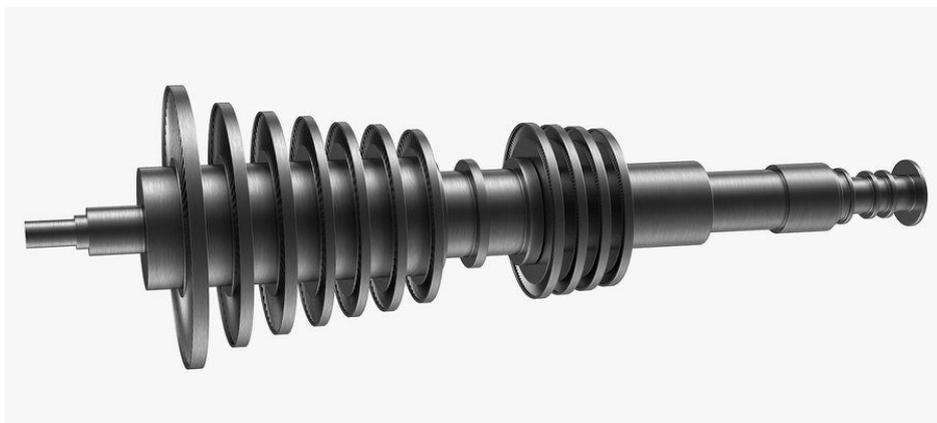


Figure I.16 : représentation d'un rotor. [.16]

- **Le stator** : Il se compose d'un corps en deux pièces, de disques à aubes fixes, de paliers et de labyrinthes. Le corps (figure I.10) en fonte comporte le canal d'entrée de la vapeur, des logements annulaires pour les disques fixes, les supports de paliers, et le canal de sortie de la vapeur. Le stator a pour fonction de diriger correctement la vapeur avant qu'elle entre dans le rotor, et de la détendre afin d'en augmenter la vitesse.



Figure I.17 : Demi-coupe d'un stator. [17]

#### I.2.5.3.4. Classification des turbines à vapeur :

Il existe plusieurs critères de classification des turbines à vapeur : [13]

##### I.2.5.3.4.1. Selon l'utilisation :

- Turbine à condensation : Dans laquelle la pression de la vapeur à la sortie est très faible (0,03 à 0,055 bars) cette pression correspond à la température de la vapeur saturée à la sortie de la turbine et elle dépend de la température de l'eau froide qui passe par le condenseur.
- Turbine à contre pression : Dans laquelle la pression à la sortie est bien supérieure à la pression atmosphérique, produise de l'électricité, et la vapeur d'échappement est utilisée pour les différentes lignes technologiques (fabriques de papier ...etc.).

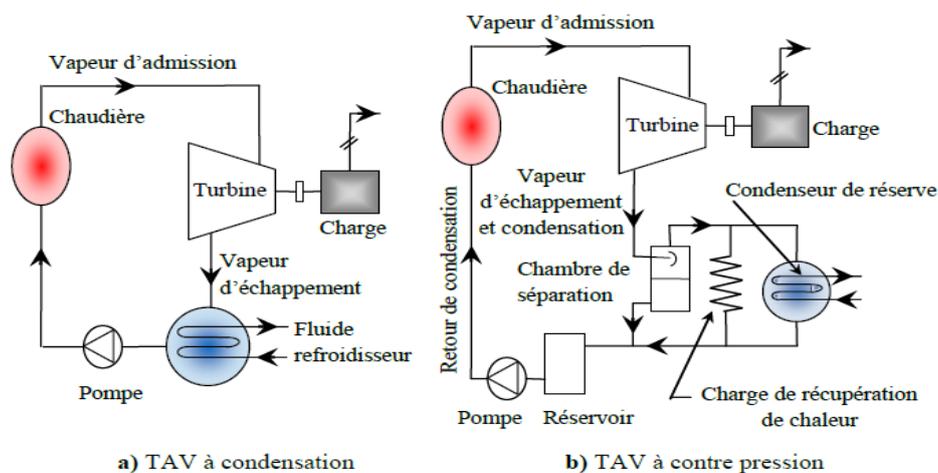
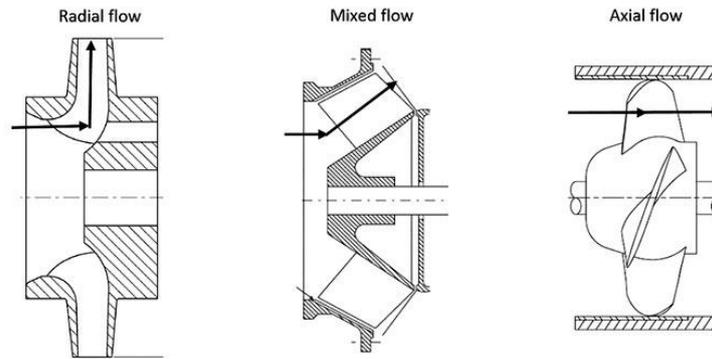


Figure I.18: Schéma d'une turbine à condensation et à contre-pression. [12]

**I.2.5.3.4.2. Selon la direction d'écoulement de vapeur :**

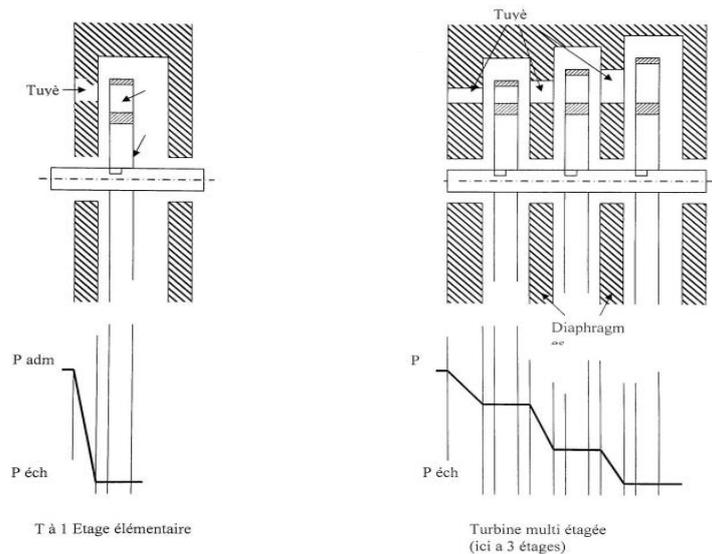
- Turbine axiale : L'écoulement de la vapeur se fait dans le même axe de rotation de la turbine, c'est la turbine la plus utilisée.
- Turbine radiale : L'écoulement de la vapeur se fait dans toutes les directions perpendiculaires à l'axe de la turbine.



**Figure I.19 : Turbine axial et radial [19]**

**I.2.5.3.4.3. Selon le nombre d'étages de rotor :**

Turbine élémentaire ou mono étagée et la turbine à éléments multiples ou multi étagée. Une turbine à vapeur comporte un ou plusieurs étages, composés chacun de deux aubages, ou grilles d'aubes, dont l'un est fixe et l'autre mobile. Le plus souvent, la direction générale de l'écoulement de la vapeur est parallèle à l'axe de la turbine.



**Figure I.20 : Turbines mono étagée et multi étagée. [20]**

Le fonctionnement d'un étage de turbine peut être conçu de deux manières, dans le premier cas, toute la détente a lieu dans l'aubage fixe, le rôle de l'aubage mobile étant d'utiliser l'énergie cinétique engendrée par cette détente ; c'est le cas d'un étage à action. Dans le second, la vapeur ne se détend que partiellement dans l'aubage fixe, le reste de la détente ayant lieu dans l'aubage mobile ; ce mode de fonctionnement caractérise l'étage à réaction. [14]

#### I.2.5.3.4.4. Selon le mode d'action :

- Turbine à action : Dans laquelle la détente se fait uniquement dans les canaux fixes, et les canaux mobiles jouent le rôle de transformer l'énergie cinétique acquise par la détente en travail mécanique communiqué au rotor.
- Turbine à réaction : Dans laquelle la détente se fait dans les canaux fixes et les canaux mobiles, Le rotor se présente en générale sous la forme d'un tambour sur lequel sont fixées les aubes mobiles.

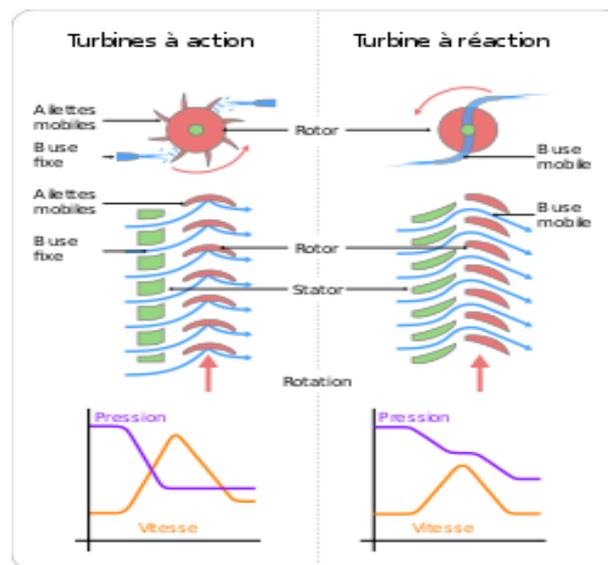


Figure I.21 : Turbine à action et à réaction. [10]

#### I.2.5.3.4.5. Selon le mode de construction :

- Turbine à un corps : C'est construit pour des puissances faibles ou moyennes jusqu'à 20 MW. [13]

Turbine à plusieurs corps : Est construite pour les centrales thermiques à puissance élevée, elle comprend deux ou trois corps (haute pression (HP), moyenne pression (MP), basse pression (BP)).

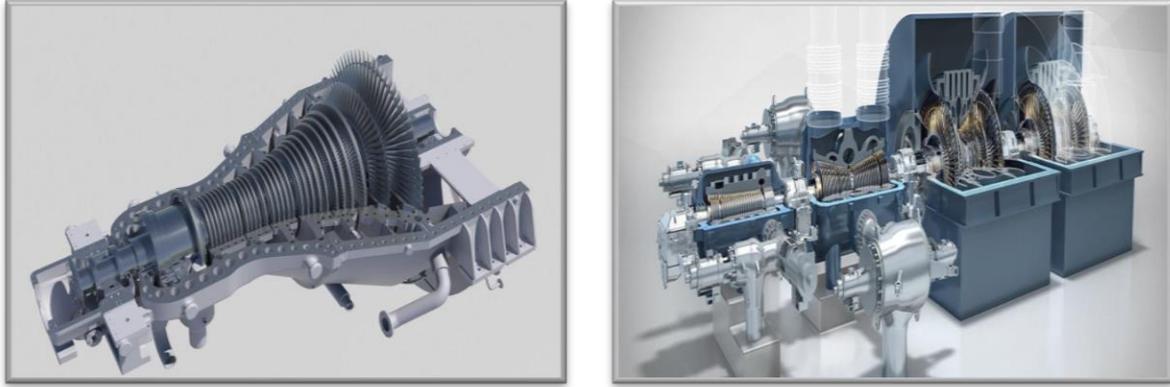


Figure I.22: Turbine à un corps et à plusieurs corps. [.20]

### I.2.5.3.5. Principe de fonctionnement :

La turbine à vapeur est un moteur à combustion externe, fonctionnant selon un cycle thermodynamique se distingue par le changement d'état affectant le fluide moteur qui est en général de la vapeur d'eau.

Le fluide à l'état liquide se passe par une pompe pour augmenter la pression. Pendant ce processus, le volume et la température du liquide changent à peine, puisqu'il est à l'état liquide.

[15]

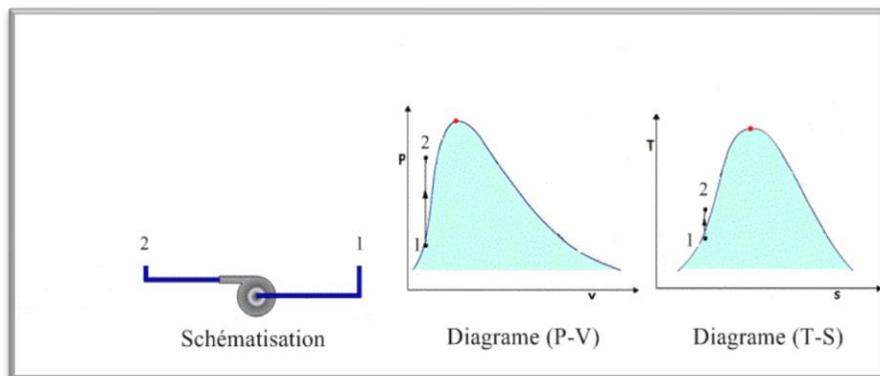
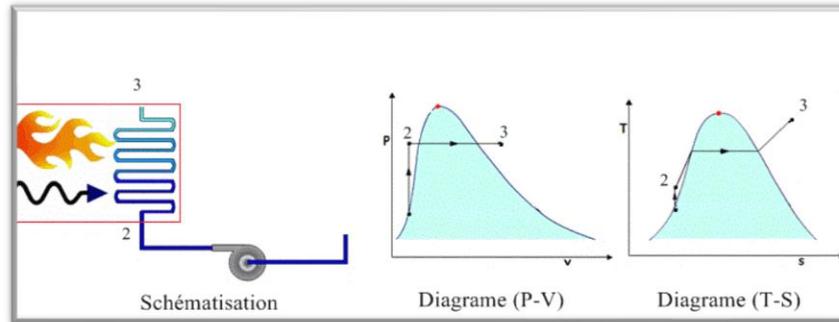


Figure I.23 : La pompe comprime le liquide. [.20]

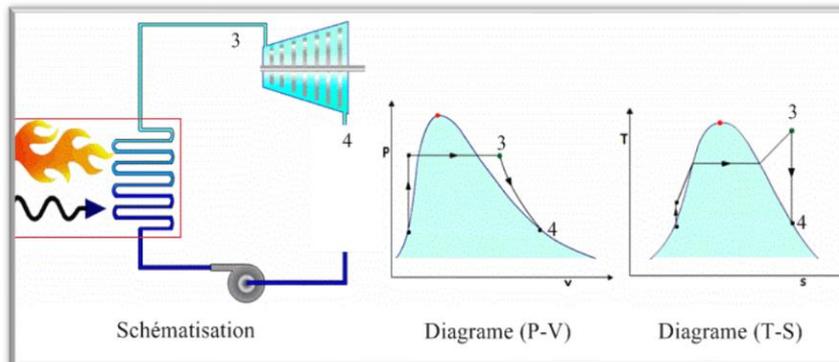
Puis, à travers un échangeur de chaleur appelé la chaudière. La pression du fluide reste la même, puisqu'il est libre de se dilater dans les tubes de l'échangeur de chaleur. La température augmente et le liquide se transforme en vapeur.



**Figure I.24 : L'apport de chaleur à la chaudière. [20]**

La vapeur à haute température et haute pression produite par la chaudière se traverse une turbine, où les aubes de la turbine sont entraînées en rotation par de la vapeur. Ceci produira à son tour une vapeur basse pression et basse température à la sortie de la turbine. [15]

La variation de pression et de volume est indiquée dans le diagramme (P-V) et (T-S) ci-dessous.



**Figure I.25 : Chute de pression et de température de la vapeur lorsque la turbine en absorbe l'énergie. [20]**

Le fluide produit par la turbine avant de passer à la pompe pour retourner le cycle à nouveau, il doit retourner à l'état liquide. Un condenseur est utilisé à cet effet, qui rejette la chaleur dans l'environnement et convertit la vapeur en liquide. Idéalement, il n'y aura pas de changement de pression pendant ce processus de rejet de chaleur, puisque le fluide est libre de se dilater dans le condenseur. Les changements de fluide sont indiqués dans le diagramme (P-V) et (T-S) ci-dessous. [15]

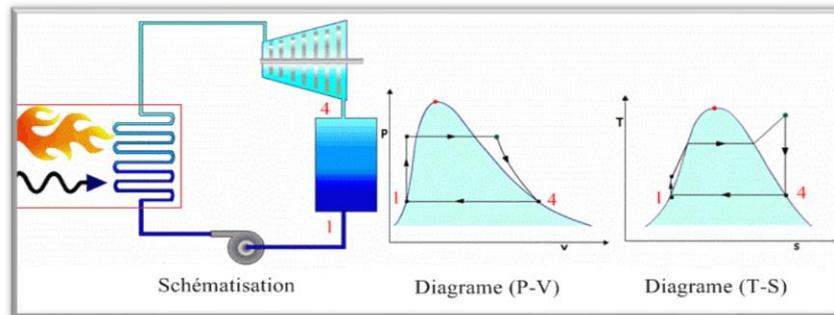


Figure I.26 : Utilisation du condenseur pour transformer la vapeur en état liquide. [.20]

### I.2.5.3.6. Transfert d'énergie aux rotors :

La vapeur se détend dans les tuyères, ce qui a pour effet de réduire la pression et d'augmenter la vitesse, puis la vapeur passe à travers les aubes du rotor, il perd de l'énergie aux pales du rotor. Pour cette raison, l'énergie cinétique et enthalpique du vapeur descend pour un rotor typique.

Lorsque l'énergie cinétique diminue, la vitesse de l'écoulement diminue. Pour augmenter la vitesse, nous passons directement ce flux à un autre ensemble des pales fixes (stator). Lorsque le fluide passe à travers les pales du stator, la vitesse du fluide augmente en raison de sa forme particulière, ainsi une partie de l'énergie enthalpique sera convertie en énergie cinétique. Ainsi l'enthalpie du courant diminue et l'énergie cinétique du courant augmente. Il est à noter qu'ici il n'y a pas d'addition d'énergie ou de retrait du flux, ce qui se passe ici c'est la conversion de l'énergie enthalpique en énergie cinétique. Maintenant, cette vapeur de fluide peut être transmise aux pales de rotor suivantes et le processus peut être répété [16]. La variation de vitesse et d'enthalpie de l'écoulement de la vapeur est montrée dans la figure suivante :

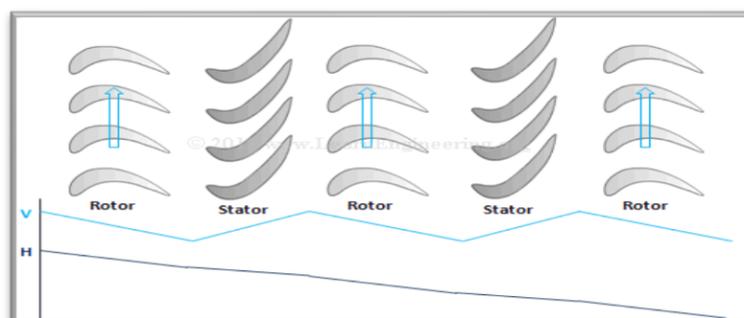


Figure I.27: Variations de vitesse et d'enthalpie à travers les étages de rotor et de stator d'une turbine à vapeur typique. [.20]

**I.2.5.3.7. Domaines d'applications :**

Les turbines à vapeur sont notamment utilisées dans la production d'électricité à partir d'énergie thermique ou pour la propulsion des bateaux. Dans les systèmes de cogénération c'est à dire utilisant à la fois la chaleur de traitement (celle utilisée lors d'un processus industriel) et l'électricité, la vapeur est portée à haute pression dans une chaudière, puis extraite de la turbine à la pression et à la température exigées par ce procédé. Dans ce cas, la turbine est dite à contrepression.

Les turbines à vapeur peuvent être utilisées en cycles combinés avec un générateur de vapeur qui récupère la chaleur. Les unités industrielles sont utilisées pour entraîner des machines, des pompes, des compresseurs et des générateurs. Leur puissance nominale va de quelques centaines de Watts à plus de 1 300 MW. La turbine à vapeur est parfois associée à une turbine à gaz. Le rendement de la turbine à gaz étant faible, elle est généralement utilisée pour la production d'énergie de pointe, les calories des gaz d'échappement de la turbine à gaz servant à faire fonctionner la chaudière de la turbine à vapeur.

- **Avantage :** Le principal avantage des turbines à vapeur c'est qu'ils sont des moteurs à combustion externe. De ce fait, tous les combustibles (gaz, fuel, charbon, déchets, chaleur résiduelle) et notamment les moins chers peuvent être utilisés pour l'alimenter en vapeur. Le chauffage peut même se faire par énergie solaire. Le rendement peut atteindre des valeurs assez élevées d'où des frais de fonctionnement réduits.
- **Inconvénients :** Le coût et la complexité des installations les réservent le plus souvent à des installations de puissance élevée pour bénéficier d'économies d'échelle. Hormis des cas particuliers, les moteurs et turbines à gaz sont mieux adaptés en dessous d'environ 10 MW. Le refroidissement du condenseur nécessite des grands débits d'eau ou des aéroréfrigérants encombrants ce qui limite d'emblée leur domaine d'emploi aux installations fixes ou navales. [17]

**I.2.5.3.8. Central thermique :**

Une centrale électrique thermique est une centrale qui produit de l'électricité à partir d'une source de chaleur selon le principe des machines thermiques. Cette transformation se fait soit directement, par détente des gaz de combustion, soit indirectement, via un cycle eau-vapeur. Les installations à cogénération utilisent en outre une partie de la chaleur résiduelle pour d'autres applications, telles que les réseaux de chaleur.

L'origine de cette source de chaleur dépend du type de centrale thermique :

- Centrales thermiques à flamme, utilisant généralement un combustible fossile (charbon, gaz naturel, fioul, certaines huiles minérales) ou d'autres types de combustibles (déchets d'activités économiques, ménagers, etc.) ;
- Centrale nucléaire, utilisant l'énergie dégagée par la fission de noyaux d'uranium 235 ou de plutonium 239 ;
- Centrale géothermique, utilisant l'énergie géothermique profonde ;
- Centrale solaire thermodynamique, utilisant la chaleur reçue du soleil via un dispositif de concentration [18]

*Chapitre II :*

*Les Turbines à vapeur*

**Introduction :**

La machine à vapeur utilisée dans une centrale de production d'électricité peut être une turbine ou un moteur à vapeur. A partir de la production d'un fluide chaud (air, fluide thermique, eau ou vapeur d'eau) en chaudière, la production de force motrice est réalisée par la détente de la vapeur dans une turbine ou un moteur à vapeur sur le principe thermodynamique du cycle de Rankine. L'utilisation de la force motrice pour entraîner un alternateur permet de produire de l'électricité.

Les technologies des centrales à vapeur peuvent s'avérer particulièrement intéressantes dans le contexte des pays tropicaux ayant de la biomasse disponible en abondance pour un usage combustible.

Dans ce chapitre, on va présenter en détaille la construction de la turbine à vapeur ainsi que la différence amélioration affectée sur le cycle idéale de Rankine.

## **II.1. Recherche bibliographique :**

De nombreuses études ont été réalisées à propos la fonction et l'amélioration de la turbine à vapeur, on cite parmi elle :

**Samir Bouter** a fait dans son mémoire de fin d'étude une comparaisant entre deux types d'aubage dans une turbine à vapeur. Ce mémoire portera en premier sur la connaissance de deux types essentiels de turbines : la turbine à vapeur et la turbine à gaz. Leurs définitions, avantages et inconvénients ainsi que leurs domaines d'application et mode de fonctionnement.

Ces connaissances permettront ensuite d'approfondir et de focaliser son étude sur la turbine à vapeur, et ses composants essentiels et ce que leur fonction dans l'enceinte de la machine implique comme problèmes indésirables qui nuisent au bon fonctionnement de la machine. Elle a tenté par la simulation d'une étude statique de deux modèles d'aubes de turbine à vapeur, haute pression et basse pression dessinés au préalable sous le logiciel SolidWorks en utilisant la méthode des éléments finis (MEF) de déterminer les zones de concentration de contraintes et les déformations que subissent les aubes sous la charge de la force centrifuge appliquée.

Cette dernière sera calculée et introduite dans le logiciel pour deux alliages de Métaux : l'acier allié X6Cr13 et l'alliage de Titane Ti-6Al-4V. Avec une valeur maximale de 106N, On a tiré des courbes à partir des points sondés sur la géométrie des deux modèles et trouvé la concentration de contraintes au milieu de l'intrados du modèle II. L'alliage de Titane était le choix le plus adéquat car il présente une meilleure résistance surtout pour les étages basse pression, aussi le type de matériau utilisé pour ces aubes est primordial pour endiguer la propagation de valeurs excessives des contraintes. [a]

**CHENNA Amina** à étudié le fonctionnement d'une centrale de cogénération basé sur une TAV couplée à une MS3E. Il a abordé la problématique de la pollution issue de la combustion, ainsi que le contrôle de la puissance générée par la turbine à vapeur dans une chaîne de conversion d'énergie raccordée au réseau électrique.

Il a présente les principales technologies de la cogénération résultant des différentes combinaisons entre machines thermiques d'une part, et une étude énergétique de la centrale modélisée, d'une autre part. Le travail aborde aussi le contrôle de pression, la vitesse et puissance de l'ensemble chaudière-turbine à vapeur, à une vitesse variable et constante.

Ce travail illustre le comportement dynamique d'une TAV connectée au réseau électrique, ainsi que sa commande. Deux modes de fonctionnements sont considérés ; contrôle de puissance avec une connexion directe au réseau électrique. L'optimisation de puissance est réalisée par une commande du hacheur à partir de la régulation du courant d'excitation à la sortie de la machine, et le courant d'excitation calculé à partir de la puissance réactive. Le second cas est le contrôle de puissance avec une connexion indirecte au réseau électrique. [b]

**CHELBI MONCEF ELISLEM** a proposé de faire un bilan exergétiques d'une installation thermique à vapeur. L'objectif principal est de donner un véritable « diagnostic » concernant l'état thermodynamique de la centrale étudiée. Les pertes exergétiques, ainsi que le rendement global de la centrale sont évaluées et discutés. Il est établi que la demande en matière d'énergie est devenue très importante. En contrepartie, les coûts de production de l'énergie sont très élevés, ce qui nécessite une bonne compréhension des moyens de production. Parmi ces moyens, les centrales thermiques à vapeur sont très utilisées.

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

## **2. Les cycles thermodynamiques de la turbine à vapeur (centrale thermique à vapeur) :**

Les cycles des turbines à vapeur utilisent un guide compressible, qui change d'état au cours du cycle. Le changement d'état de la vapeur génère des variations importantes de l'enthalpie qui permet de transformer de grandes quantités de chaleur en travail. Dans une turbine la vapeur d'étendue de façon continue dans un système de roues à aubes. Cette propriété permet de fonctionnement avec des débits importants de pousser la détente sans l'effet de troncature, comme dans les machines alternatives.

### **II.2.1. Cycle de Rankine :**

Le cycle de base d'une turbine à vapeur (cycle théorique comportant un changement d'état) est un cycle de Rankine qui se déroule totalement en vapeur humide [1]. Ce cycle comporte :

- Deux isobares (changement d'état isotherme)
- Deux adiabatiques ;

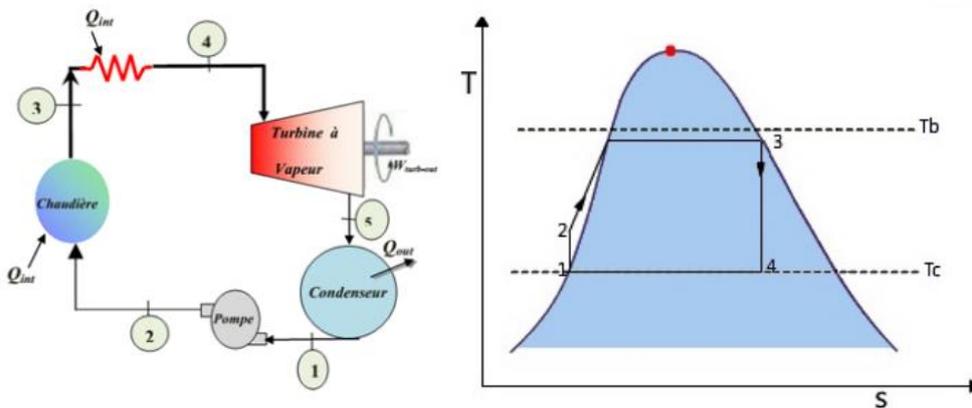


Figure II.01 : Schéma du processus coté TV et diagramme T.H de Rankine. [.1]

Comme le montré la figure II.01, le cycle est divisé en ligne suivante :

- **La ligne 1-2 :** représente l'énergie ajoutée par la pompe alimentaire. C'est l'augmentation de la pression de l'eau provenant du condenseur, grâce à une pompe d'extraction. L'élévation de pression est accompagnée d'une légère augmentation d'enthalpie.
- **La ligne 2-3 :** correspond à un apport de chaleur (représentée par Q) à l'eau entrant dans la chaudière. L'eau, dans la chaudière, passe de liquide à l'état de vapeur saturé. La production de vapeur est supposée se produit à pression constante.
- **La ligne 3-4 :** la vapeur se détend et se refroidit en traversant la turbine, l'énergie de la vapeur se transforme en travail.
- **La ligne 4-1 :** elle représente la condensation de la vapeur à la sortie de la turbine. La condensation entraîne une perte considérable de chaleur, appelée chaleur de condensation.

### II.2.2. Cycle de Hirn :

Le cycle de Hirn est un cycle de Rankine, dans lequel la vapeur sortant de la chaudière est surchauffée à une température supérieure à la température critique.

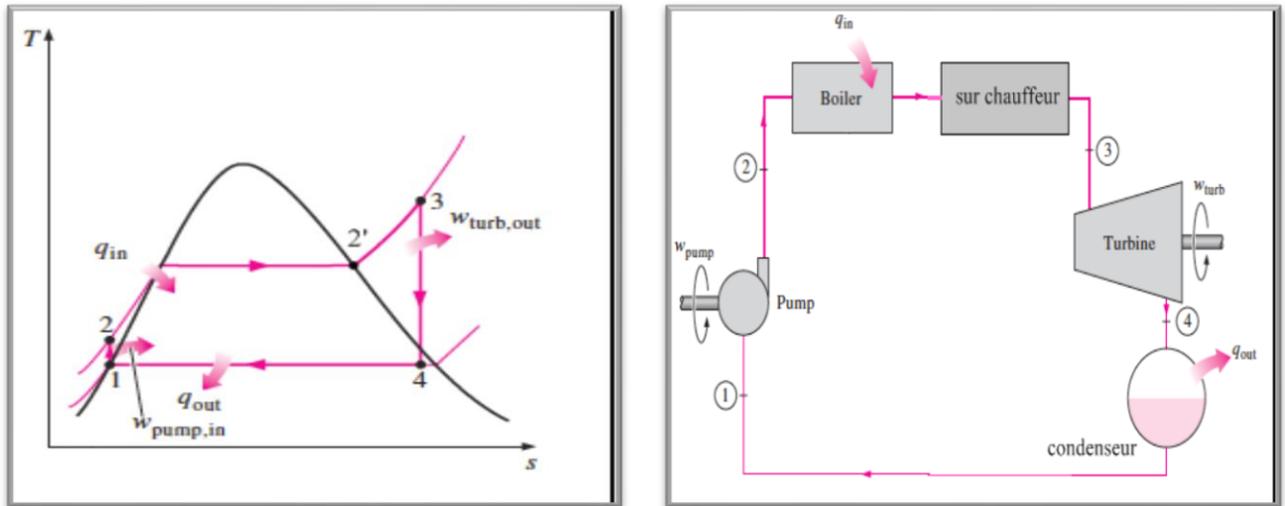


Figure II.02: Schématisation de cycle de Hirn. [2]

Le cycle de Hirn dans le diagramme (T, S) contient les processus suivants :

1→2 : Une compression isentropique réversible de l'eau.

2→2' : Échauffement à pression constante puis vaporisation dans la chaudière.

2'→3 : La surchauffe de la vapeur, s'effectue dans la surchauffeur.

3→4 : Détente adiabatique réversible.

4→1 : La condensation de la vapeur, s'effectue dans le condenseur. [2]

### II.2.3. Cycle de Hirn avec resurchauffe :

La resurchauffe améliore assez modérément le rendement du cycle thermodynamique mais augmente celui des aubages (ailettes de la turbine) suite à la réduction du degré d'humidité dans les derniers étages de la turbine. [3]

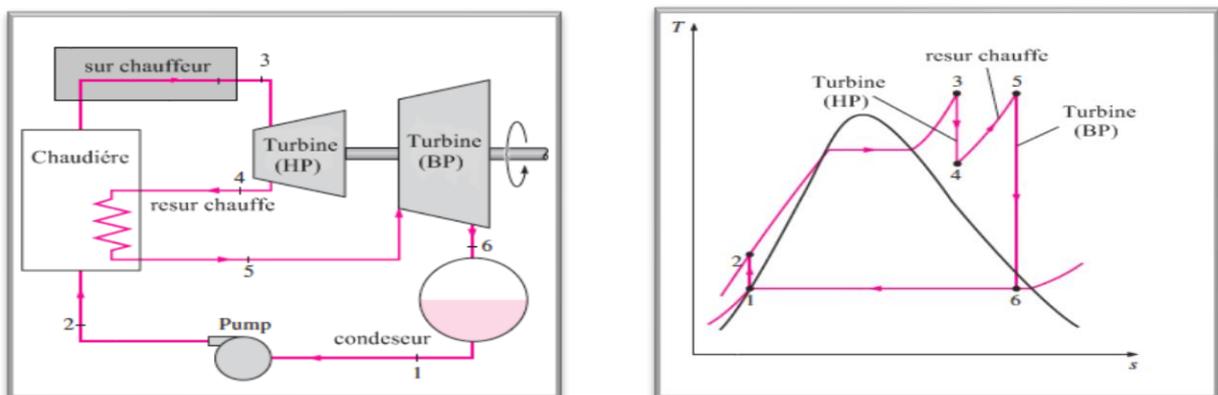


Figure II.03: Schéma de cycle de Hirn à resurchauffe. [2]

Le cycle de Hirn à resurchauffe dans le diagramme (T, S) contient les processus suivants :

1→2 : Une compression adiabatique réversible de l'eau.

2→3 : Vaporisation à pression constante puis la surchauffe.

3→4 : Détente partielle adiabatique réversible.

4→5 : resurchauffe isobare de la vapeur.

5→6 : Détente adiabatique réversible.

6→1 : La condensation de la vapeur à pression constante.

### II.2.4. Cycle à soutirage :

Le principe de ce cycle consiste à extraire, à un étage de la turbine une partie du débit total de vapeur et à diriger ce débit soutiré dans la chaudière.

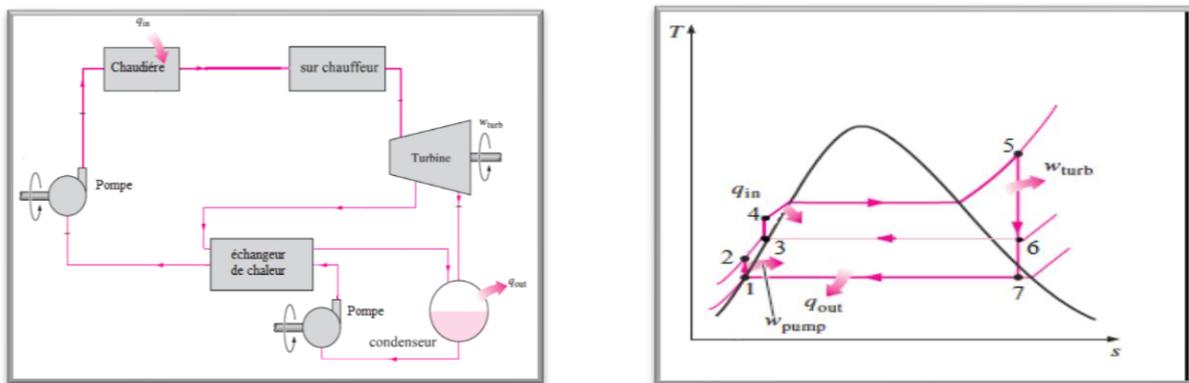


Figure II.04 : Schéma d'une installation à vapeur soutirée [2]

Une partie de la chaleur contenue dans cette vapeur va, au lieu d'être rejetée en pure perte au condenseur, être transmise à l'eau d'alimentation. [3]

Une fraction de vapeur est prélevée en cours de détente dans la turbine à la pression  $P_6$  et à la température  $T_6$ , le reste de la vapeur poursuit sa détente jusqu'à la pression  $P_7$  dans le deuxième étage de la turbine.

Dans le réchauffeur la vapeur soutirée se condense et réchauffe l'eau liquide revenant du condenseur (préalablement comprimé par une pompe jusqu'à la pression  $P_2$ ) à laquelle elle se mélange.

### II.2.5. Cycle à régénération :

L'examen du diagramme T-s du cycle Rankine idéal révèle que la chaleur est transmise au caloporteur à basse température durant l'évolution 2-2'. Cela réduit la température moyenne pendant l'addition de chaleur et donc le rendement thermique du cycle. La solution envisager est d'élever la température du liquide sortant la pompe, appelé l'eau d'alimentation, avant de l'admettre dans la chaudière. Cette façon de faire est appelée la régénération.

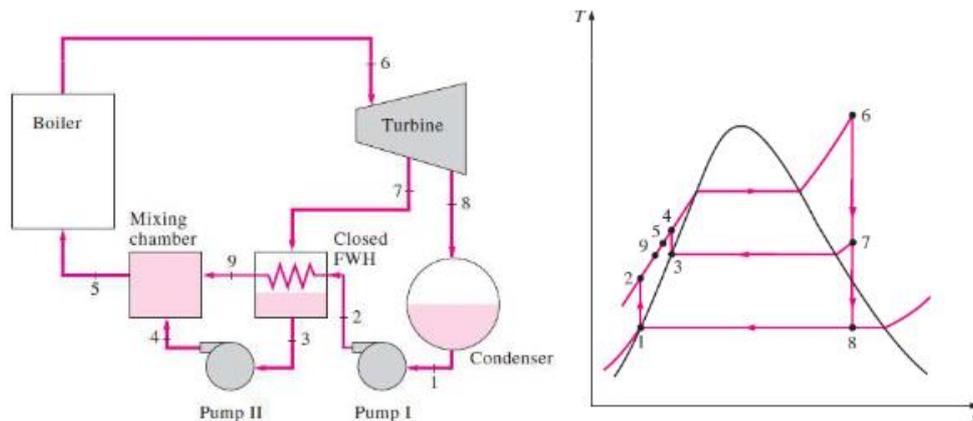


Figure II-05 : Le cycle à régénération avec réchauffeur à surface [.5]

Le réchauffeur à surface est un échangeur de chaleur dans le réchauffeur à surface la vapeur soutirée de la turbine n'est pas mélangée à l'eau d'alimentation. Les écoulements se trouvent à des pressions différentes

### II.2.6. Cycle de Rankine réel :

L'écart entre le cycle de Rankine idéal et le cycle à vapeur réel est montré à la figure ci-dessous. Cet écart est dû aux irréversibilités dans les processus générés par :

- Ecart de perte de pression des les tuyautai.
- Effet des pertes thermique dans la turbine et la pompe.

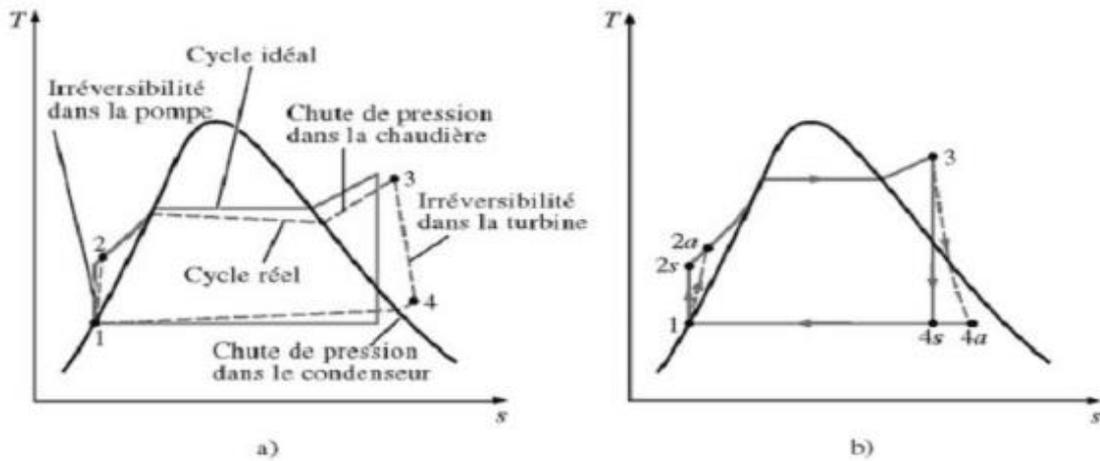


Figure II.06 : Diagramme (T, S) de cycle de turbine à vapeur réel et idéal. [1]

La figure (II.6.a) montre l'écart entre le cycle à vapeur réel et idéal. La figure (II.6.b) illustre les effets des irréversibilités dans la turbine et la pompe sur le cycle réel de turbine à vapeur.

### II.3. Les opérations d'amélioration du cycle de Rankine :

#### II.3.1. Effet de la surchauffe :

Considérons à présent l'effet de la surchauffe représentée par la figure (II.7) ci-dessous :

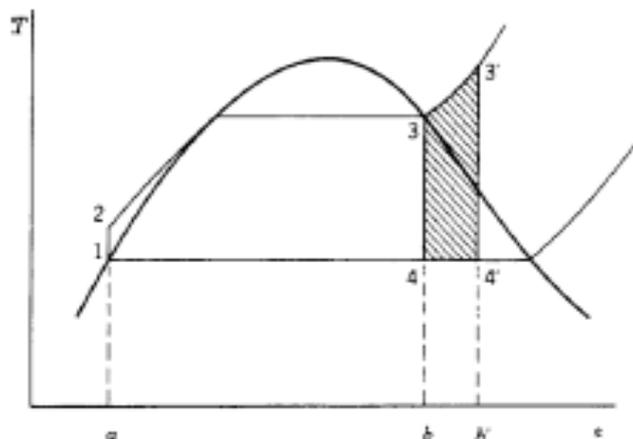


Figure II.07 : diagramme T-S avec surchauffe [7]

Le travail induit par la surchauffe de la vapeur est représenté sur le diagramme par l'aire hachurée, et la quantité de chaleur est indiquée par l'aire 3-3'-b'-b-3. Cette quantité de chaleur supplémentaire donne une augmentation de l'efficacité. Correspondant au fait que la température moyenne lors de la teneur en eau à l'échappement diminue.

### II.3.2. Effet de la pression maximale :

On considère à présent l'effet d'une augmentation de pression maximale, à température maximale et à pression de condenseur constantes ; représenté par la figure (II.8) suivant :

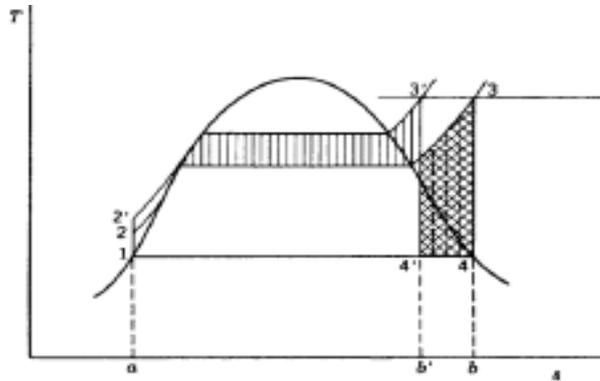
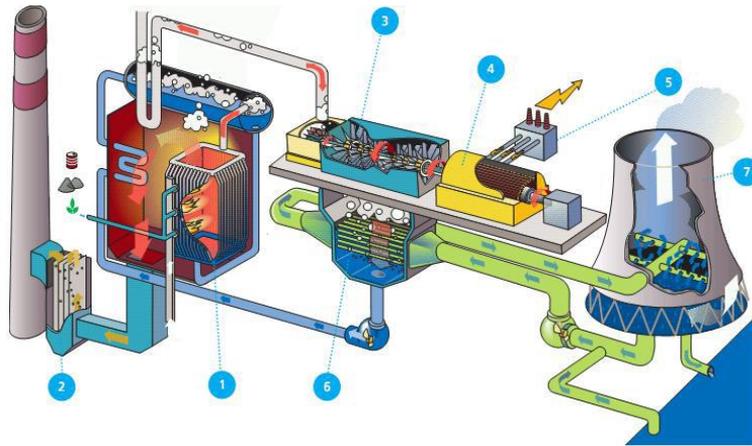


Figure II.08 : Effet de la pression maximale. [7]

Le travail net augmente de la surface hachurée verticalement et diminue de la surface aux hachures croisées, de sorte qu'il reste à peu près constant. Par ailleurs, la chaleur rejetée diminue de l'aire  $4'-4-b-b'-4'$ , de sorte que l'efficacité et le rendement énergétique augmentent également. Mais la teneur en eau à l'échappement augmente. [4]

### II.4. Centrales thermiques à vapeur :

Les centrales thermiques à vapeur jouent un rôle central dans l'approvisionnement en énergie électrique. En plus de la production d'électricité, une partie de la chaleur produite par les centrales thermiques à vapeur est parfois utilisée pour alimenter le chauffage urbain. Le cycle de vapeur selon Clausius-Rankine est aujourd'hui encore l'un des cycles les plus importants et les plus répandus dans l'industrie. Dans une centrale thermique à vapeur, une turbine à vapeur entraînée par de la vapeur produit de l'énergie mécanique. Cette énergie mécanique est transformée en énergie électrique dans des générateurs. La vapeur requise peut être produite p.ex. au moyen d'énergie nucléaire, de combustibles fossiles, d'énergie solaire ou par géothermie. [5]



**Figure II.09 : Installation du central a thermique à vapeur. [.9]**

La figure II.09 représente une centrale thermique à vapeur composé des éléments suivants :

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

Le cycle de la vapeur d'eau est une suite de transformations dans des systèmes ouverts successifs (chaudière, turbine. Condenseur et pompe d'alimentation). Le cycle de Rankine est utilisé dans les centrales thermiques.

## **II.4.1. Les organes principaux du central thermique :**

### **II.4.1.1. La turbine à vapeur :**

La turbine à vapeur comprend une partie fixe appelée stator qui porte des aubages directeurs. La vapeur en provenance de l'évaporateur est admise dans un collecteur. Elle s'écoule ensuite dans des canaux fixes (c'est là où l'énergie thermique se transforme en énergie cinétique) et dans des canaux mobiles (les énergies thermiques et cinétiques sont transformées

en énergie mécanique). Les canaux fixes et mobiles se succèdent les uns à la suite des autres dans le sens de l'écoulement. La vapeur en provenance du générateur de vapeur est introduite dans les premiers étages de la turbine à travers des vannes d'admission et des soupapes de réglage asservies aux dispositifs de sécurité et de réglage de la turbine. La vapeur est détendue adiabatiquement en produisant un travail mécanique. La détente de la vapeur à travers les divers étages de la turbine se fait de façon différente selon qu'il s'agisse de turbines à action ou à réaction [6]

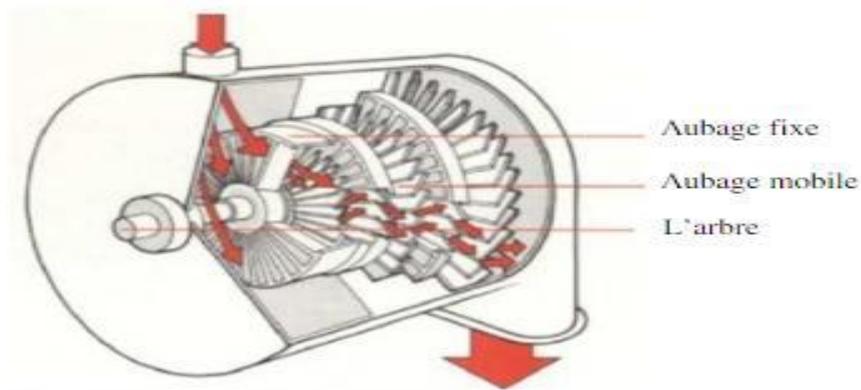


Figure II.10 : Conception de la turbine à vapeur. [.10]

#### II.4.1.2. Principe de fonctionnement :

Bien que les turbines à vapeur (Figure II.10) soient construites selon deux configurations différentes (à action ou à réaction), leurs éléments essentiels sont similaires. Elles se composent de tuyères ou de jets, et d'ailettes (aubes). La vapeur s'écoule dans les tuyères, dans lesquelles elle se dilate, ainsi, sa température diminue et son énergie cinétique augmente. La vapeur en mouvement exerce une pression contre les aubes, entraînant leur rotation. La disposition des jets et des aubes, fixes dépend du type de turbine.

À la sortie du dernier condenseur, l'eau peut être de nouveau vaporisée et surchauffée, l'eau ou la vapeur récupérée en sortie est ramenée vers la chaudière par des pompes. La turbine à vapeur utilise les principes de la thermodynamique, lorsque la vapeur se dilate, sa température et donc son énergie interne diminuent. Cette diminution de l'énergie internes accompagne d'une augmentation de l'énergie cinétique sous forme d'une accélération des particules de vapeur (une réduction de 100 kJ de l'énergie interne, due à la dilatation, peut provoquer un accroissement de la vitesse des particules de vapeur de l'ordre de 2 800 km/h), à de telles vitesses, l'énergie disponible est très importante. Lorsque la pression de la vapeur d'eau en sortie de la turbine est égale à la pression atmosphérique, la turbine est dite à condensation.

Aujourd'hui, les turbines à vapeur sont généralement limitées à une température maximale de 580 °C dans le premier étage, et à une pression maximale d'admission de 170 à 180 bars [7].

### **II.4.1.3. Description du T.V :**

Toutes les turbines à vapeur sont composées d'un même ensemble de pièces. Que ce soit les mono étagées ou les multi étagées, elles ont toutes besoin des mêmes composants pour fonctionner. Ces ensembles de pièces sont :

#### **II.4.1.3.1. La distribution :**

Le distributeur, ou tuyère, ou bloc tuyères selon la conception de la pièce, est une des pièces principales. En effet c'est au travers des tuyères que le flux de vapeur perd de la pression au profit d'une vitesse pouvant atteindre aisément le mur du son (Plus de  $400 \text{ m.s}^{-1}$  soit 1440 km/h).



**Figure II.11 : Distributeur. [11]**

#### **II.4.1.3.2. Les diaphragmes :**

Ils sont formés de deux demi disques. Les sections de passage de la vapeur dans chaque diaphragme sont formées par des aubages. Leur utilisation est faite :

- Premièrement pour renverser la vapeur et la mettre de nouveau dans le sens de rotation des aubages mobiles.
- Deuxièmement, en fonction du profil adopté des aubes, modifier la pression et la vitesse de la vapeur lorsqu'elle passe à travers le diaphragme. Ils ont la double fonction de tuyère et de redresseur.

Les ailettes fixes sont assemblées dans une pièce appelée redresseur dans les mono étagées et diaphragmes dans les multi-étages.

**II.4.1.3.3. Le rotor :**

Les turbines à vapeur sont des machines dont la seule partie mobile importante est le rotor. Le rotor assemblé est constitué de toutes les pièces qui tournent à l'exclusion de l'accouplement. Il comporte essentiellement un arbre et des roues à aubes.

**II.4.1.3.4. L'arbre :**

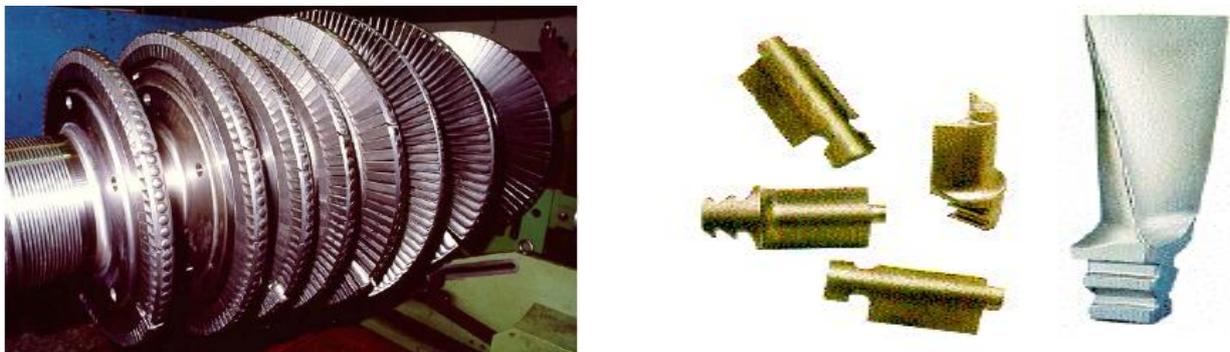
Jusqu'à 8000 tr/min, le rotor est à roues rapportées sur l'arbre par frettage à chaud. Pour augmenter la sécurité de fonctionnement, chaque roue en plus du frettage, est clavetée. Quand la vitesse dépasse les 8000 tr/min, les roues et l'arbre du rotor sont forgés dans la masse et usinés. Cette construction monobloc permet d'abaisser les contraintes en cours de fonctionnement à pleine charge. L'arbre est garni en outre de fines cannelures destinées au labyrinthe.



**Figure II.12 : Rotor. [11]**

**II.4.1.3.5. Les roues :**

Les roues sont constituées d'un disque sur lequel on vient insérer des ailettes sur toute la périphérie. Chaque roue est équilibrée seule avant le montage sur l'arbre et l'arbre est équilibré après chaque nouvelle roue d'installée.



**Figure II.13 : Les roues et les ailettes. [11]**

Pour fixer les ailettes sur le rotor, il existe plusieurs moyens d'accrochage (en fonction de la pression générée par le distributeur ou les diaphragmes) mais deux principales sont retenues :

L'ancrage en forme de pied de sapin et l'ancrage en T

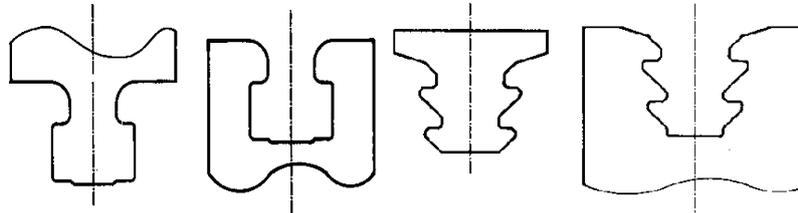


Figure II.14 : L'ancrage en forme de pied de sapin et l'ancrage en T. [11]

L'ailette se compose d'un ancrage, d'une surface portante et d'un tenon. Le tenon devenant le rivet qui maintient la jante. Les embouts des aubes sont rivés afin d'assurer la rigidité de l'ailettage. La jante (bande) a pour but de maintenir le sommet de l'ailette en place pendant la rotation, d'atténuer les vibrations et de réduire les fuites vapeur.

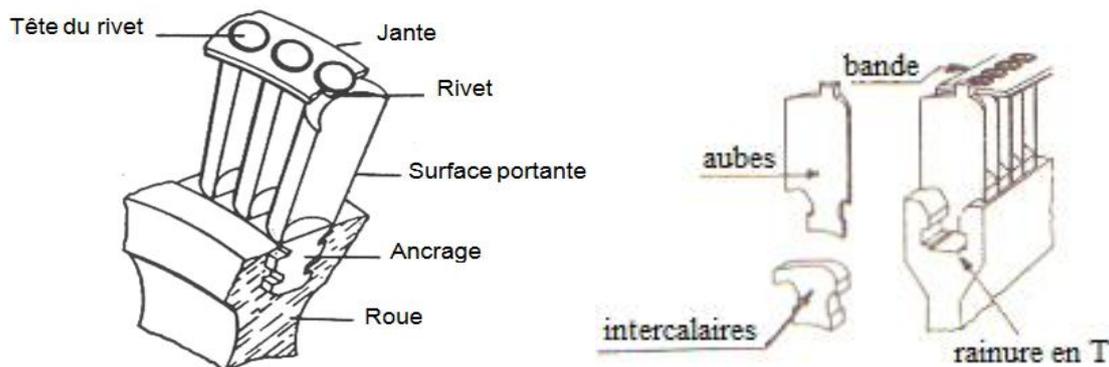


Figure II.15 : Composent d'une ailette [11]

Une aube et une pièce intercalaire sont alternativement placées dans la rainure en T. Le rôle des intercalaires est de ménager un canal entre les aubes, canal dans lequel circulera la vapeur.

#### II.4.1.3.6. Les paliers :

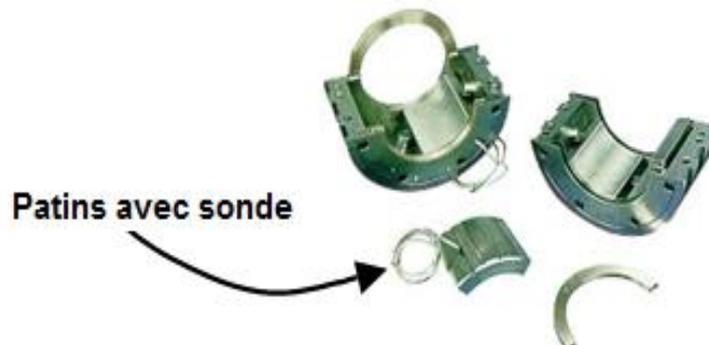
Il existe une grande quantité de paliers (coussinets), qu'ils soient lisses, à patins ou à billes. Dans les turbines à vapeur, les paliers ont deux forces à combattre :

- La masse du rotor.
- La force axiale engendrée par la poussée de la vapeur sur les aubages.



**Figure II.16 : Coussinets lisses, à patins ou à billes. [16]**

Le graissage des paliers et de la butée est du type hydrodynamique, c'est à dire que les surfaces flottantes sont séparées en marche par un film d'huile suffisamment épais pour éviter tout contact entre les parties métalliques. L'huile est amenée sous pression ou par barbotage d'une bague pendant la rotation du rotor. Sur les paliers à patins, les charges étant plus importantes, il est nécessaire de s'assurer de la température de la surface portante. Pour cela deux patins sont équipés de sondes de température qui enregistrent via un transmetteur la température.



**Figure II.17 : Patins avec sonde [16]**

#### **II.4.1.3.7. Les étanchéités :**

Il y a deux sortes d'étanchéités à faire sur une turbine à vapeur :

##### **II.4.1.3.7.1. Etanchéité pour la vapeur :**

Selon les conditions d'exploitation, les garnitures d'étanchéité sont réalisées par des bagues carbone, pour les monos étagés ou les multi-étages basses vitesses, ou par des labyrinthes, pour les turbines hautes vitesse et entre les étages.

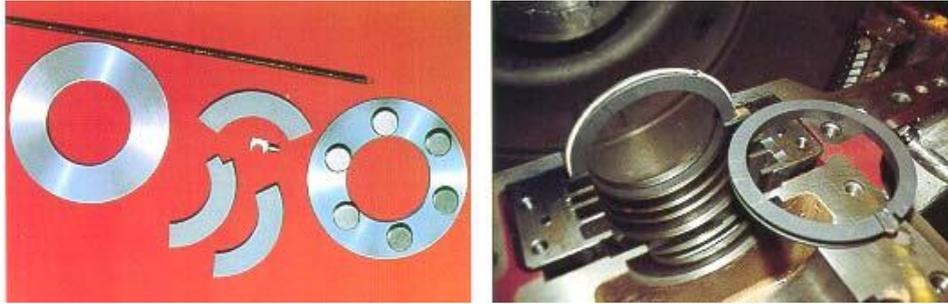


Figure II.18 : Les anneaux carbonés. [.16]

Ces anneaux ne sont pas montés sur les turbines à hautes températures ou à grande vitesse périphérique d'arbre.

Les labyrinthes constituent l'étanchéité entre l'arbre et le stator. C'est un système qui est basé sur la perte de charge créée par l'inflexion brutale d'un fluide dans des chicanes.

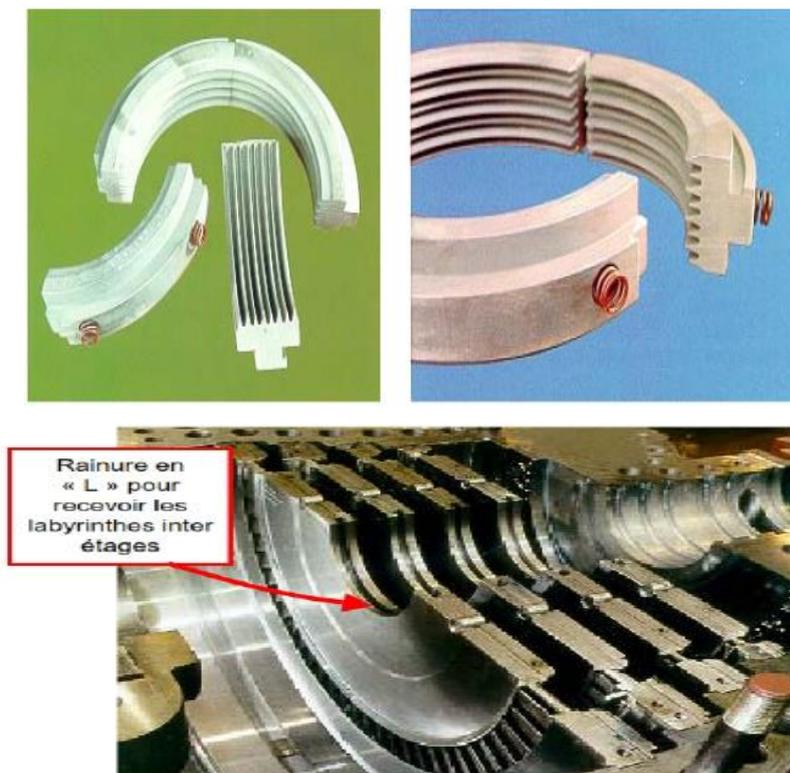


Figure II.19 : Les labyrinthes [.16]

Pour les mono étagées, seule une étanchéité sur l'extérieur est nécessaire. Etanchéité sur l'extérieur, voulant dire empêcher la vapeur de sortir le long de l'arbre. Cette vapeur, qui s'échappe le long de l'arbre, peut contaminer l'huile se trouvant dans les paliers et en se condensant, détériore ainsi les caractéristiques de cette dernière. La pollution de l'huile entraîne

une corrosion et provoque une cassure prématurée des paliers. Par ailleurs, toute fuite de vapeur à l'atmosphère correspond à une perte d'énergie, une réduction des performances et une augmentation substantielle des coûts.

#### II.4.1.3.7.2. Etanchéité pour l'huile :

L'étanchéité pour l'huile est plus "facile" à réaliser. Les pressions d'huile n'étant pas très importantes des labyrinthes ou juste un déflecteur sont souvent suffisants.

#### II.4.1.3.8. Graissage :

Dans la turbine à vapeur, seuls les paliers nécessitent une lubrification. En raison des fortes charges sur les coussinets et de la grande vitesse du rotor, la puissance dissipée par frottement (et par conséquent la chaleur dissipée) est importante. Aussi il faut un graissage abondant des paliers par pompe à huile avec réfrigérateur. [8]

### II.4.2. La chaudière :

La chaudière c'est un générateur de chaleur produisant généralement de l'eau chaude pour le chauffage. Ce n'est pas la seule utilisation d'une chaudière qui peut produire de la vapeur, le plus souvent pour des applications industrielles.

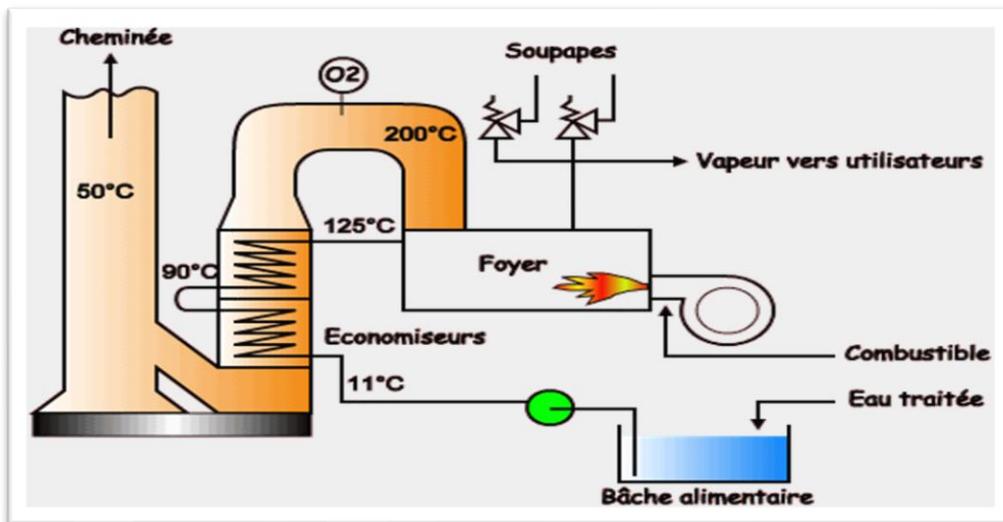


Figure II.20 : Schématisation d'une chaudière. [.20]

Une chaudière comporte un corps de chauffe Avec un circuit d'eau intégré qui récupère la chaleur (énergie thermique) produite par les gaz brûlés (combustion). Elle présente un rendement de combustion. C'est dire qu'une chaudière qu'elle soit une chaudière gaz, ou une chaudière au fioul ou une chaudière bois pourra présenter différents rendements selon les

applications qu'elle sert. D'où la notion d'économies d'énergie et d'efficacité énergétique de ladite chaudière. [9]

### II.4.2.1. Eléments constituant une chaudière :

#### II.4.2.1.1. Chambre de combustion :

C'est dans cette chambre que l'on brûle le mélange air combustible en libérant une certaine quantité de chaleur. Les murs latéraux et le plafond de cette chambre sont tapissés. L'échange thermique se fait par rayonnement, dans les tubes en acier appelés « tubes écrans ». La sortie du gaz chaud (fumées) se fait généralement à travers une partie de la paroi latérale.

#### II.4.2.1.2. Brûleurs :

Les brûleurs sont des mécanismes, dans lesquels l'énergie chimiquement liée dans les carburants est libérée lorsqu'on les brûle. Ils sont intégrés essentiellement dans des chaudières pour le chauffage de l'eau et la génération de vapeur.

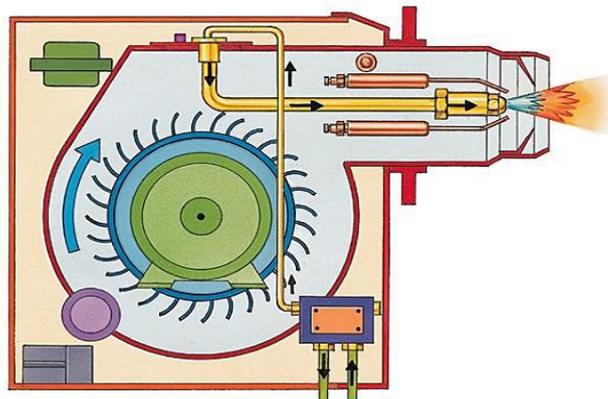


Figure II.21 : Un brûleur. [.21]

Les brûleurs doivent engendrer la meilleure combustion possible c'est pour cela qu'il faut assurer un mélange homogène entre le carburant et le comburant au niveau du foyer.

#### II.4.2.1.3. Economiseur :

L'économiseur joue le rôle d'un échangeur de chaleur dont l'objectif est d'augmenter la température de l'eau d'alimentation qui provient du de gazeur à l'aide de la récupération d'une partie des calories restantes dans les gaz de combustion. L'économiseur est donc un échangeur de chaleur.

#### II.4.2.1.4. Réservoir (Ballon supérieur) :

La figure II-22 représente le ballon supérieur, qui joue le rôle d'un réservoir dans lequel est stockée l'eau d'alimentation. Il s'établit dans le réservoir un plan d'eau dont le niveau est maintenu à une valeur constante (50%). Au-dessus de ce plan, se trouve la vapeur saturée ou humide qui se dégage vers l'échangeur de surchauffe.

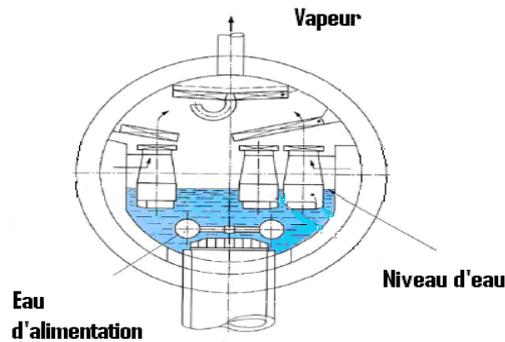


Figure II.22 : Le ballon supérieur [.21]

#### II.4.2.1.5. Surchauffeurs :

Les surchauffeurs reçoivent extérieurement les gaz venants directement de la chambre de combustion. Ce sont les faisceaux tubulaires du générateur de vapeur qui sont soumis aux températures les plus élevées. La vapeur saturée venant de la partie haute de réservoir, passe dans les tubes des surchauffeurs, où sa température est élevée à pression constante. Bien que la vapeur surchauffée ne dépasse pas la température maximale autorisée par le matériel, un système de « désurchauffe » est parfois installé. Il s'agit d'un refroidissement de la vapeur.

#### II.4.2.1.6. Réchauffeur d'air :

Le réchauffeur d'air absorbe la chaleur contenue dans les fumées. Il présente plusieurs avantages :

- Accélération des réactions de la combustion.
- Diminution de l'encrassement des surfaces de chauffe par une combustion plus complète.
- Amélioration du rendement, par réduction des pertes dans les fumées. [10]

## II.4.2.2. Les différents types des chaudières :

### II.4.2.2.1. Chaudières à tubes de fumée :

Dans les premières la flamme se développe dans un tube foyer ondulé, puis les fumées parcourent des tubes, en une ou plusieurs passes, l'eau se trouvant à l'extérieur ;

Dans les secondes l'eau circule à travers un réseau de tubes, par convection naturelle ou forcée, entre deux ballons placés l'un au-dessus de l'autre. La flamme se développe dans un foyer tapissé de tubes qui absorbent le rayonnement. Un second faisceau de tubes reçoit sa chaleur des fumées par convection. L'eau monte dans les tubes soumis au rayonnement, et descend par le faisceau de convection.

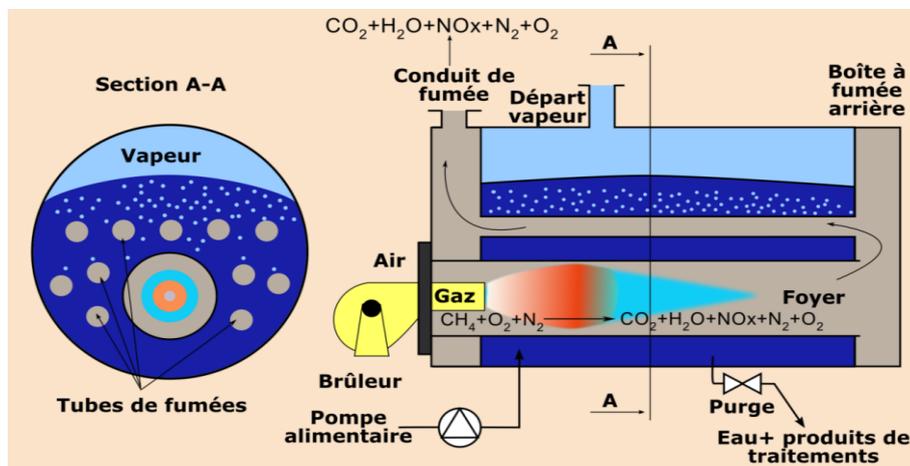


Figure II.23 : principe de fonctionnement d'une chaudière à tubes de fumée [21]

### II.4.2.2.2. Chaudière à tubes d'eau :

Les chaudières à tubes de fumées permettent d'obtenir des températures de rejet des fumées plus basses (220 à 250 °C) que les chaudières à tubes d'eau (300 °C) sans économiseur, ce qui leur confère un rendement légèrement supérieur. En revanche, les premières sont limitées à des puissances plus faibles que les secondes, pour des raisons de tenue mécanique et de sécurité (très grand volume d'eau sous pression). Leur domaine d'utilisation principal est la fourniture de vapeur saturée sous faible pression (< 15 bars), et elles représentent plus de 60 % du parc français de chaudières, contre 20 à 25 % pour les chaudières à tube d'eau, bien adaptées à la fourniture de vapeur surchauffée à moyenne et forte pression.

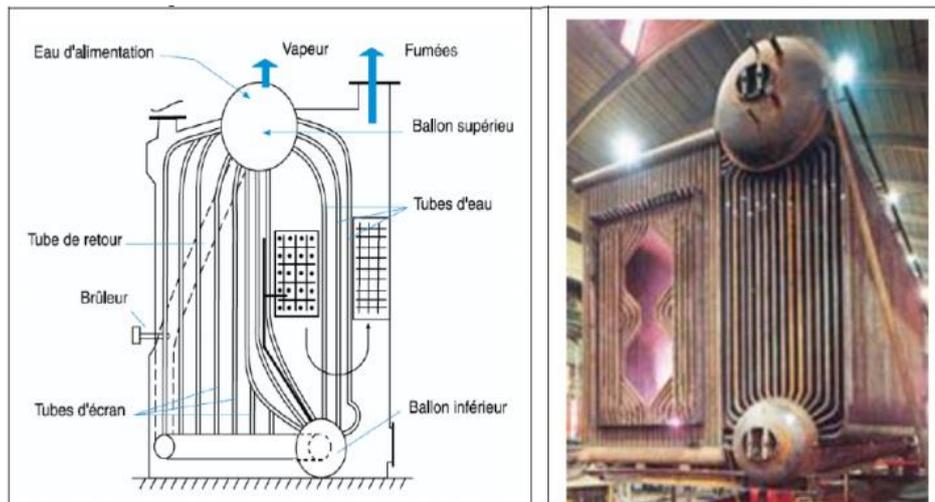


Figure II.24 : Chaudière à tubes d'eau. [.24]

### II.4.3. Une chaudière remplit trois fonctions successives :

Une chaudière remplit trois fonctions successives, premièrement de chauffer l'eau d'alimentation pressurisée jusqu'à la température de vaporisation à la pression correspondante. Deuxièmes, de vaporiser l'eau. Et finalement, la surchauffer à la température désirée. [11]

Propriétés	Chaudières à tubes de fumée	Chaudières à tubes d'eau
Mise en route (à puissance équivalente)	Lente (grand volume d'eau à chauffer)	rapide
Adaptation aux changements de régime	médiocre (inertie importante)	bonne
Surface de chauffe	moyenne	élevée
Sécurité	médiocres	bonne
Encombrement	faible	fort
Prix	limité	élevé
Applications usuelles		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puissance</li> <li>• Débit</li> <li>• Timbre (pression max. d'utilisation)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• moyennement élevée</li> <li>• 1,5 à 25 t/h</li> <li>• 10 à 20 bar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• importante</li> <li>• 4 à 200 t/h</li> <li>• 90 à 100 bar (en circulation naturelle) et jusqu'à 225 bar (circulation forcée)</li> </ul>

Tableaux II.01 : Différence entre chaudière tube d'eau et à tube de fumée [12]

Chaudière à tubes d'eau		Chaudière à tubes de fumée	
Avantage	inconvénient	avantage	inconvénient
-moins dangereuse, en cas d'incident sur le tube foyer en particulier. - une fiabilité et une durée de vie plus importante.	-son prix est très élevé, il peut aller jusqu'au double du prix de la chaudière à tube de fumée - traite un grand volume d'eau ; elle est classée en premier catégorie ; donc il doit avoir un local indépendant pour la chaufferie.	-prix faible par rapport à l'autre type. - peut souvent être classée en seconde catégorie, ce qui ne nécessite pas de chaufferie complètement indépendante.	- elle est soumise à des contraintes plus sévères que la chaudière à tubes d'eau - plus dangereuse qu'une chaudière à tubes d'eau, en cas d'incident sur le tube foyer en particulier. - une fiabilité et une durée de vie plus faible

Tableaux II.02 : Avantages et inconvénient de chaudière tube d'eau et à tube de fumée[12]

### II.4.3.1. Paramètres d'exploitation d'une chaudière :

Les paramètres d'exploitation d'une chaudière sont :

- Pression et température du fluide caloporteur (eau, vapeur et huile)
- Pression et température du combustible
- Autres : comme par exemple le Débits, O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, T° des fumées...etc.

### II.4.3.2. Première méthode :

Dans le cas des chaudières le bilan énergétique permet entre autres le calcul de la puissance à introduire dans la chaudière sous-forme de combustible, L'estimation du rendement attendu,[12]

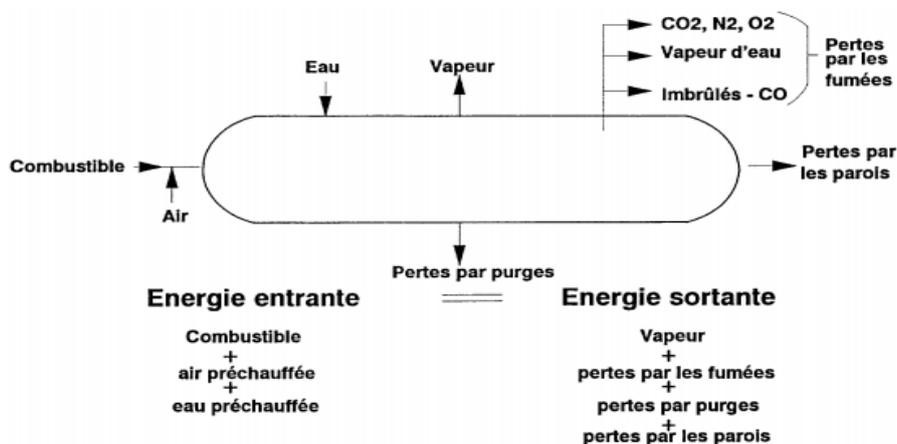


Figure II.25 : Bilan Energétique de la chaudière. [.24]

Le rendement est défini comme étant le rapport entre l'énergie produite utile et l'énergie totale introduite. Il est exprimé par la relation suivante :

$$\eta = \frac{\text{Energie Utile}}{\text{Energie Introduite}} \quad (\text{II.1})$$

La puissance utile est calculée par la formule :

$$Q_u = \sum \dot{m}_s \cdot h_s - \sum \dot{m}_e \cdot h_e \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$h_i$  : Enthalpie de l'eau entrante en  $kJ/kg$ .

$h_s$  : Enthalpie de la vapeur sortante en  $kJ/kg$ .

$\dot{m}_e$  : Débit de l'eau entrante en  $kg/s$ .

$\dot{m}_s$  : Débit de la vapeur sortante en  $kg/s$ .

Les puissances introduites dans la chaudière sont de différentes natures, la principale provenant du combustible.

Puissance introduite sous forme d'enthalpie de formation du combustible : Il s'agit du Pouvoir Calorifique Inférieur du fioul. Pour obtenir la puissance, il suffit de multiplier par le débit de combustible. Cette puissance est exprimée par :

$$Q_1 = \dot{m}_c \cdot PCI \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$\dot{m}_c$  : le débit de combustible en  $kg/s$ .

Puissance introduite sous forme d'enthalpie sensible du fioul : Etant donné que le fioul est préchauffé avant son admission dans la chambre de combustion, il possède donc une chaleur sensible. Effectivement ce préchauffage est assuré à l'aide de serpentins alimentés en vapeur comme on l'a déjà signalé précédemment. Le but de ce préchauffage est d'avoir une bonne combustion résultant d'une diminution de la viscosité du fioul. Cette puissance est exprimée par :

$$Q_{fioul} = Q_2 = \dot{m}_{fioul} \cdot C_{p-fioul} \cdot (T_f - T_r) \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$\dot{m}_{fioul}$  : Débit de fioul en  $kg/s$

$C_{p-fioul}$  : Chaleur spécifique moyenne du fuel à pression constante en  $kJ/(kg.K)$ .

$T_f$  : Température d'admission du fioul en  $K$ .

$T_r$  : Température de référence en  $K$ .

Puissance introduite sous forme de chaleur sensible de l'air comburant : Même dans le cas de l'absence d'un système de préchauffage, la température de l'air à l'entrée de la chaudière est supérieure à celle l'ambiante, ceci résulte du fait de la mise sous pression de l'air par les pompes d'aspiration. Cet air qui est aspiré du milieu ambiant est de l'air humide (mélange d'air sec et de vapeur d'eau). Cette puissance est exprimée par :

$$Q_a = Q_3 = \dot{m}_a \cdot C_{p-a} \cdot (T_{aa} - T_r) \quad (II.5)$$

Avec :

$\dot{m}_a$  : débit d'air en  $kg/s$ .

$C_{p-a}$  : chaleur spécifique moyenne de l'air à pression constante et à une température moyenne en  $kJ/(kg.K)$ .

$T_{aa}$  : température d'aspiration de l'air  $K$ .

La puissance globale introduite dans les chaudières est la somme de trois puissances :

$$Q_{in} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (II.6)$$

#### II.4.3.3. Deuxième méthode :

La quantité de chaleur perdue constitue l'écart entre l'énergie totale introduite et l'énergie utile reçue par l'eau de la chaudière. Elle regroupe principalement :

- ❖ Les pertes par fumées  $Q_f$ .
- ❖ Les pertes par parois  $Q_p$ .

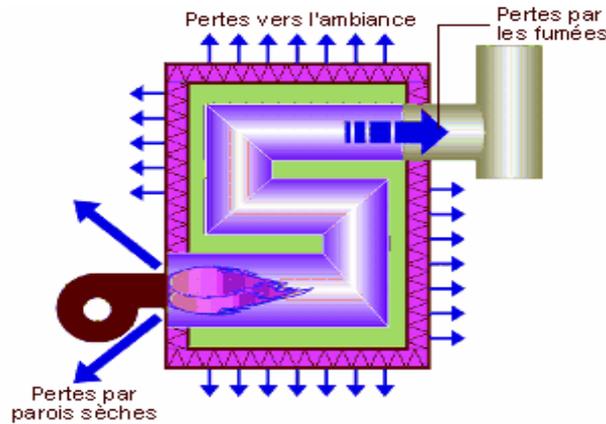


Figure II.26 : Pertes d’une chaudière lorsque son brûleur est en fonctionnement. [.21]

La perte globale est la somme de deux types de pertes :

$$\pi = Q_f + Q_p \quad (\text{II.7})$$

#### II.4.3.3.1. Pertes par fumées :

Les pertes par les fumées proviennent :

- De la chaleur sensible contenue dans les fumées qui sont nettement plus chaudes que l'air aspiré dans la chaufferie.
- Des imbrûlés issus d'un mauvais mélange entre l'air et le combustible, Provoquant la production de CO au lieu de CO<sub>2</sub> (la chaleur dégagée est alors inférieure à celle fournie par une combustion complète).

Une augmentation des pertes par les fumées peut provenir soit d'un mauvais excès d'air qui peut être dû à :

- Un mauvais réglage au niveau du brûleur.
- Des problèmes d'entretien tels qu'une mauvaise distribution de l'air ou une mauvaise pulvérisation du fioul.

Les trois mesures  $T_f$ ,  $T_a$  et %CO<sub>2</sub> étant faites, on évalue les pertes par chaleur sensible dans les fumées en pourcentage du PCI à l'aide de la formule de Siergert suivante : [12(a)]

$$Q_f = K \cdot \frac{T_f - T_a}{\%CO_2} \quad (\text{II.7.1})$$

$T_f$ : température des fumées

$T_a$  : température de l'air ambiant.

$\%CO_2$  : teneur en  $CO_2$  des fumées (en %).

$K$  est le coefficient de Siergert varie avec le combustible. Il est déterminé par la formule :  $K = 0,008*\%CO_{2max} + 0,48$ .

#### II.4.3.3.2. Pertes par parois :

Elles sont dues aux échanges thermiques par rayonnement et par convection entre l'air ambiant et les parois de la chaudière. Ces pertes dépendent des dimensions des parois et de la nature de leurs matériaux de construction. Elles sont exprimées par la relation suivante : [12(b)]

$$Q_p = \dot{P} \cdot C \cdot \frac{P_m}{P} \quad (\text{II.7.2})$$

$C$  : Coefficient d'écran ( $C = 0.75$ )

$P'$  : Valeur de la perte par parois à la  $M$ , exprimée en pourcentage du PCI du fioul consommé généralement entre 0,59 et 0,60.

$PM$  : Puissance maximale de la chaudière

$P$  : Puissance de la chaudière lors de l'essai

#### II.4.3.3.3. Rendement de la combustion :

Lorsqu'on ne tient compte que des pertes par fumées, le rendement obtenu est appelé « rendement de la combustion » calculé par la relation suivante :

$$\eta_c = 100 - \text{Pertes fumées en \%} \quad (\text{II.8})$$

#### II.4.3.3.4. Rendement global :

Le rendement global est exprimé comme suit :

$$\eta_g = 100 - \frac{\text{Pertes}}{\text{Energie Introduite}} = 100 - \frac{\pi}{Q_{in}} \quad (\text{II.9})$$

#### II.4.3.4. Le transfert de chaleur dans les chaudières à vapeur :

Un générateur de vapeur est un mélange complexe des trois modes d'échanges de chaleur (rayonnement, convection, conduction). La dominance des échanges par convection et rayonnement diminue l'importance de la conduction. Dans un premier temps, les méthodes de calculs pour les modes de transfert de chaleur sont présentées indépendamment. Dans un

deuxième temps, les méthodes de calculs sont combinées dans le but de faire un bilan global dans un générateur de vapeur.

#### **II.4.3.4.1. Rayonnement dans une chaudière à vapeur :**

Une chaudière est chauffée par réaction chimique d'un gaz, d'un liquide ou d'un solide avec de l'air dans la chambre de combustion. Cette réaction chimique donne naissance à une flamme et à des produits de combustion (fumée). Dans une chambre de combustion (~1000°C) les gaz avec les molécules à trois atomes participent de façon significative dans l'échange radiatif ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ). La couleur de la flamme provient des petites particules imbrûlées (liquide ou solide) dans les produits de la réaction (fumées).

#### **II.4.3.4.2. Convection dans une chaudière à vapeur :**

Les fumées issues de la réaction de combustion échangent de la chaleur le long des tubes jusqu'à la sortie du générateur. En plus d'échanger par rayonnement, elles échangent par convection :

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (\text{II.10})$$

Le calcul du coefficient de convection ( $h$ ) dépend des propriétés thermo physiques du fluide (Fumée), de la température, de la vitesse et de la géométrie. [12(c)]

#### **II.4.3.4.3. Conduction dans les chaudières à vapeur :**

La conduction dans un générateur est présente mais n'est pas dominante. Afin d'accroître la précision des calculs, le calcul de la conduction dans la chambre de combustion est nécessaire dû à la présence de réfractaire. Le réfractaire est un bon isolant, il est couramment utilisé pour la protection des tubes proches des flammes.

De plus, les pertes de chaleur d'une chaudière dépendent directement de l'épaisseur d'isolation (conduction). La distribution du flux au travers des tubes et du réfractaire est équivalent à deux murs superposés ce qui correspond à deux épaisseurs et deux conductivités différentes, représenté à la figure (Figure II.27)

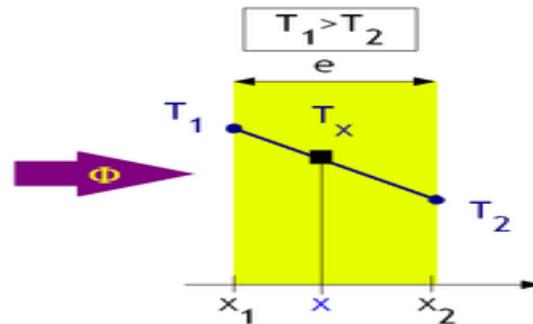


Figure II.27 : Distribution de la température avec flux constant [21]

La conduction au travers des tubes ne représente qu'une toute petite partie de l'échange total. Si on met en équation la résistance totale au travers des tubes (figure II.27), on obtient :

$$R = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{k_e} + \frac{1}{h_i} \quad (\text{II.11})$$

Le coefficient convectif pour un changement de phase est de l'ordre de 10000W/m K, [12(a)]. La résistance thermique côté changement de phase est donc négligeable dans l'équation (III.2) de plus, le terme de la résistance thermique totale représentant la conduction est lui aussi très petit car la paroi du tube est mince. Il ne reste que le terme de résistance thermique représentant la convection des fumées de combustion sur les tubes qui possède une importance prépondérante sur les deux autres. Une approche rigoureuse utilise tout de même la résistance thermique totale. [13]

#### II.4.4. Le condenseur :

Echangeur thermique au sein duquel le fluide thermodynamique gazeuse à haute pression passe à l'état liquide en cédant de la chaleur au milieu à traiter ou au fluide caloporteur. Permet de faire le vide dans certaines installations. Il est de coutume de désigner par condenseur un appareil dont la fonction principale est de condenser de la vapeur, le réchauffage obligatoire du fluide froid auxiliaire n'étant qu'une conséquence (parfois nuisible), par opposition aux échangeurs de chaleur (réchauffeurs) où la condensation de vapeur n'est qu'un moyen d'obtenir le but désiré : le réchauffage d'un certain fluide. [14]

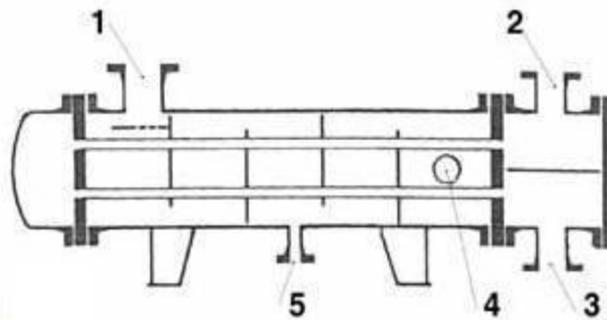
##### II.4.4.1. Classification des condenseurs :

On peut classer les condenseurs en deux grandes familles :

- Les condenseurs par surface, sans contact entre la vapeur à condenser et le fluide réfrigérant, une surface d'échange s'interposant entre eux ;

La figure II.28 représente un condenseur par surface avec deux entrées et trois sorties réparties comme suite :

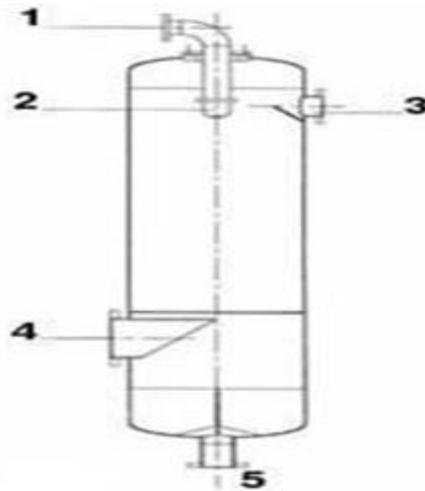
1. Arrivée de vapeur à condenser.
2. Sortie d'eau.
3. Entrée d'eau.
4. Sortie des incondensables.
5. Sortie des condensats.



**Figure II.28 : Schématisation de condenseur par surface. [.9]**

- Les condenseurs par mélange avec, comme leur nom l'indique, mélange total entre la vapeur à condenser et le fluide réfrigérant.

Ces derniers restent très peu utilisés du fait de l'impossibilité de mélange entre la vapeur et l'eau de refroidissement, en général de l'eau brute. Pour condenser une vapeur saturée, la physique nous enseigne qu'il faut soutirer à cette vapeur une certaine quantité de chaleur, dite enthalpie de vaporisation, et la céder à une source froide. Un condenseur a donc besoin d'une source froide qui est, dans le cas le plus général, un liquide bon marché. Étant donné les débits calorifiques mis en jeu, il s'est avéré que la source froide la moins chère était l'eau, mais on utilise aussi l'air comme réfrigérant.



**Figure II.29 : Schématisation de condenseurs par mélange. [9]**

La figure II.29 représente un condenseur par mélange avec deux entrées et trois sorties réparties comme suit :

1. Arrivée d'eau.
2. Pulvérisateur.
3. Sortie des incondensables.
4. Entrée des vapeurs à condenser.
5. Sortie des condensats.

#### **II.4.4.2. Principe de fonctionnement :**

Les condenseurs sont souvent des échangeurs de chaleur à calandre et faisceau tubulaire. La condensation se fait presque systématiquement dans la calandre. On utilise généralement des tubes d'un centimètre de diamètre et de longueur comprise entre 2 et 6 mètres, avec un pas triangulaire ou un pas carré. Un des critères pour ces choix est souvent la perte de charge, surtout pour des appareils travaillant à pression réduite. Dans le cas d'une pompe à chaleur, le fluide frigorigène, après avoir emmagasiné de la chaleur et s'être évaporé dans l'évaporateur, circule dans un circuit fermé. Ensuite, il passe à proximité d'une source plus fraîche (air, sol ou eau) et ainsi se condense pour refaire un cycle. Cet échangeur de chaleur permet la condensation du fluide frigorigène. Ce phénomène exothermique permet de restituer de la chaleur au médium (eau, air...), donc de le réchauffer. C'est par exemple le cas dans une chaudière à condensation.

[15]

**II.4.4.3. Bilan thermique :**

Calcul de la puissance thermique du condenseur à partir de la relation suivante :

$$Q_c = \dot{m} \cdot Cp \cdot (T_s - T_e) \quad (II.12)$$

Avec  $Q_c = Q_{Cédée} = Q_{Recue}$

$$Q_{Cédée} = U \cdot A \cdot DTLM \quad (II.12.1)$$

Soit, k est le coefficient des pertes thermiques de l'échangeur :

$$k = \frac{Q_f}{Q_c} \quad (II.13)$$

Calcul de la différence logarithmique moyenne de température :

$$DTLM = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}\right)} \quad (II.14)$$

La surface d'échange est la principale caractéristique des échangeurs, elle se calcule avec la formule ci-dessous :

$$A = \frac{Q_{Cédée}}{U \cdot DTLM} \quad (II.15)$$

U = coefficient d'échange global par  $W/(m^2 \cdot K)$

Tout d'abord, il faut connaître quelques valeurs du coefficient d'échange global, U.

Caractérisation physique	U	
	Btu/h ft <sup>2</sup> °F	W/m <sup>2</sup> °C
Paroi extérieur en briques, intérieur en plâtré, non isolée	0.45	2.55
Paroi isolée avec la laine de roche	0.07	0.4
Fenêtre avec double verre plat	0.4	2.5
Condenseur de vapeur	100	560
Échangeur Eau-à-Eau	20-60	110-350
Échangeur vapeur / fioul lourd	10-30	56-170
Échangeur vapeur / kérosène ou gasoil	50-200	280-1140

**Tableau II.03 : Valeurs approximatives des coefficients d'échange global. [15(a)]**

### II.4.5. Les pompes :

Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un fluide. Ils répondent toutes au même besoin, déplacer un liquide d'un point à un autre, pour déplacer ce liquide il faut lui communiquer de l'énergie, les pompes remplissent cette fonction, le moteur qui alimente les pompes transforme l'énergie thermique ou électrique en énergie mécanique pour permettre le mouvement des organes des pompes, cette énergie mécanique est retransmise au fluide. Cette énergie fluide se traduit sous forme de débit (énergie cinétique) et de pression (énergie potentielle) ses énergies vont s'échanger et se consommer dans les circuits de l'installation.



**Figure II.30 : Présentation d'une pompe. [.30]**

Les mouvements retransmis aux organes des pompes sont comme tous les mouvements mécaniques de deux grands types :

- **Rotatif.**
- **Rectiligne (alternatif).**

Le mode de déplacement du fluide au travers des pièces en mouvement de la pompe et leur fonction permet de classer les pompes en plusieurs familles.

- **Pompes de transfert :**
  - Pompe rotative (axial)
  - Pompe rotative (centrifuge)

➤ **Pompes de dosage :**

- Pompe rotative (volumétrique)
- Pompe alternative (volumétrique)

### II.4.5.1. Caractéristiques :

#### II.4.5.1.1. La cylindrée :

C'est le volume de fluide aspiré et expulsé pour un mouvement. Dans le cas des pompes rotatives la cylindrée s'exprime en (cm<sup>3</sup>/tour) ou en (m<sup>3</sup>/rad).

#### II.4.5.1.2. Le débit :

C'est le volume de fluide transvasé par unité de temps, il se calcule en fonction de la cylindrée. Dans le cas d'une pompe rotative, on a :

$$\dot{V} = V_e \cdot N \quad (\text{II.16})$$

Avec N (tr/min) fréquence de rotation du moteur entraînant la pompe et V<sub>e</sub> cylindrée en (cm<sup>3</sup>/tr).

#### II.4.5.1.3. La différence de pression :

Elle caractérise la capacité de la pompe à augmenter la pression du fluide qui la traverse. La différence de pression est faible pour une pompe centrifuge, elle peut être importante pour une pompe volumétrique.

$$\Delta p = p_{s,th} - p_e \quad (\text{II.17})$$

#### II.4.5.1.4. Puissance mécanique (ou théorique) :

C'est la puissance fournie par le moteur en entrée pour produire la différence de pression théorique. La puissance mécanique se note P<sub>M</sub> et s'exprime en watts (W).

$$P_M = \dot{V}_{th} \cdot \Delta p_{th} \quad (\text{II.18})$$

**II.4.5.1.5. Puissance hydraulique (ou réelle) :**

C'est la puissance fournie par le fluide en sortie (ou la puissance fournie par le moteur en entrée pour produire la différence de pression réelle). La puissance hydraulique se note  $P_H$  et s'exprime en watts (W).

$$P_H = \dot{V}_r \cdot \Delta p_r \quad (\text{II.19})$$

**II.4.5.1.6. Le rendement volumétrique :**

C'est le rapport entre le débit théorique (calculé avec la cylindrée) et le débit effectivement obtenu. Le rendement volumétrique est toujours inférieur à 1 en raison des fuites.

$$\eta_v = \frac{Q_{v,r}}{Q_{v,th}} \quad (\text{II.20})$$

**II.4.5.1.7. Le rendement mécanique :**

C'est le rapport entre le couple effectivement nécessaire et le couple (ou la force) théoriquement nécessaire pour produire la différence de pression.

$$\eta_m = \frac{C_e}{C_r} \quad (\text{II.21})$$

**II.4.5.1.8. Le rendement global :**

C'est le rapport entre la puissance hydraulique fournie par la pompe et la puissance mécanique absorbée par la pompe. C'est aussi le produit du rendement volumétrique par le rendement mécanique. [16]

$$\eta_g = \frac{P_H}{P_M} \quad (\text{II.22})$$

**II.4.5.2. Le rôle des pompes dans la centrale thermique à vapeur :**

Les centrales au charbon sont des usines qui convertissent l'énergie thermique du charbon, du pétrole, du gaz naturel ou d'autres combustibles fossiles en électricité. La production d'électricité est une forme plus importante de production d'électricité, qui représente environ 70% de la production d'électricité en Chine.

La pompe à eau de refroidissement de la centrale thermique comprend la pompe à condensat, la pompe de surpression, la pompe, la pompe de vidange, la pompe d'alimentation, la pompe à eau brute, la pompe à cendres, etc. Les techniques de ces pompes sont compliquées.

**II.4.5.3. Les types des pompes :****II.4.5.3.1. Pompe d'alimentation de chaudière :**

La pompe d'alimentation de la chaudière est l'équipement utilisé pour alimenter le réservoir d'oxygène en eau et en chaudière haute pression. C'est une pompe de soutien importante pour les centrales électriques. En cas d'accident de la pompe, la chaudière peut se dessécher et d'autres accidents graves. Donc, sa fiabilité est plus élevée. La pression de sortie de la pompe est très élevée, c'est pourquoi une pompe centrifuge multicellulaire est utilisée. La structure globale de la pompe est généralement divisée à un débit de 274 m/h. La température du liquide peut atteindre 160 ° C et le corps de la pompe est sous pression de 12 MPa avec une vitesse de 3600 tr / min. Les grandes unités modernes à haute pression utilisent souvent une simple structure double circulaire.

**II.4.5.3.2. Pompe à condensat :**

La pompe de condensation est utilisée pour extraire le condenseur 25 ~ 35c dans le coagulateur et l'envoyer à l'appareil de désaération à travers le réchauffeur basse pression. Les conditions de travail sont mauvaises, nous devons donc garder les pompes complètement fermées. L'entrée de la pompe est dans un état de vide, ce qui pourrait facilement gazéifier l'eau. Ainsi, ses performances anti-cavitation sont plus élevées. La vitesse de la pompe n'est donc pas très élevée. Il est également nécessaire d'ajouter une roue à induction ou une double roue d'aspiration avant l'entrée.

**II.4.5.3.3. Pompe de circulation d'eau de chaudière :**

Pompe centrifuge à circulation d'eau verticale, élévation générale jusqu'à 8 Ohms, le débit peut atteindre 2000 m/h, la température du liquide peut atteindre 345°C, la pression du corps de la pompe est de 16 MPa, la vitesse de rotation est de 3600 tr/min. Il peut être utilisé pour une grande chaudière à circulation forcée.

**II.4.5.3.4. Pompe de surpression :**

Afin d'éviter la cavitation de la pompe d'alimentation de la chaudière, une pompe d'appoint est installée devant la pompe d'alimentation. Son ascenseur général est jusqu'à 400 m, le débit peut atteindre 6120 m/h, la température du liquide peut atteindre 220 °C, la pression du corps de la pompe est de 5 Mpa et la vitesse de rotation est de 1800 tr/min.

### II.4.5.3.5. Pompe de circulation d'eau :

Les condenseurs de vapeur, les refroidisseurs et les refroidisseurs de générateur utilisent des pompes à eau de circulation pour fournir de l'eau de refroidissement. La caractéristique de fonctionnement de la pompe de circulation est une basse pression et un grand débit. Par conséquent, la pompe centrifuge à double arbre à un étage est utilisée dans des unités de petite et moyenne taille, qui peuvent atteindre 10000 mètres / heure, et la température du liquide peut atteindre 160 ° C. [17]

### II.5. Les différents états de l'eau et de la vapeur :

La vapeur est l'état gazeux de l'eau, l'évaporation de l'eau est le changement de phase et d'état de l'eau du liquide à l'état gazeux qui peut être utilisé dans plusieurs domaines domestiques et industriels.

La vapeur est produite dans des chaudières chauffées par un combustible fossile, parfois électriques, ou bien plus généralement par ébullition de l'eau mise au contact d'une source chaude.

Lorsque l'eau est chauffée au-delà de son point d'ébullition, elle s'évapore, c'est-à-dire qu'elle devient de l'eau à l'état gazeux. La vapeur d'eau peut toutefois prendre diverses formes. Ses propriétés varient grandement en fonction de la pression et de la température à laquelle elle est soumise.

Dans l'article sur les applications de la vapeur, nous avons présenté plusieurs types d'applications utilisant la vapeur. Dans l'article qui suit, nous discuterons des types de vapeur qu'utilisent ses applications.

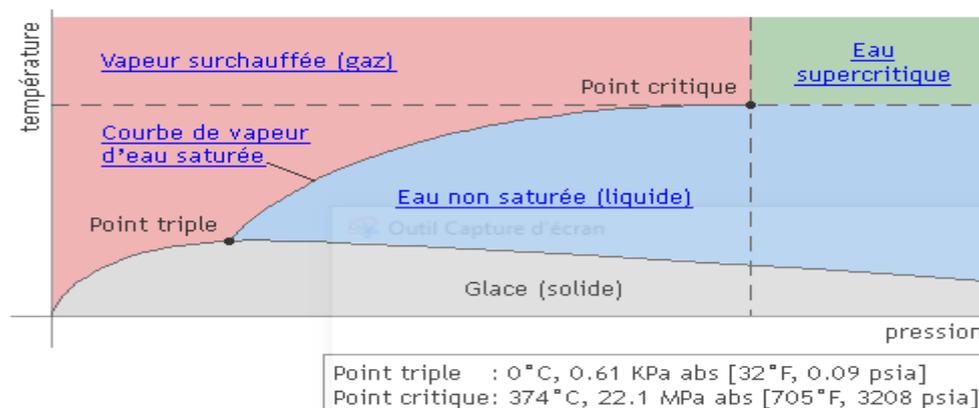


Figure II.31 : Les différents états de l'eau et de la vapeur [31]

On obtient de la vapeur saturée (sèche) en bouillant de l'eau jusqu'à son point d'ébullition (chaleur sensible) et ensuite en lui fournissant encore plus de chaleur pour qu'elle se vaporise (chaleur latente). Si cette vapeur est chauffée au-delà de son point de saturation, elle devient de la vapeur surchauffée (chaleur sensible).

### II.5.1. Vapeur d'eau saturée :

Comme indiqué par la ligne grise sur la figure II.32, la vapeur d'eau saturée existe seulement à une température et à une pression où l'eau à l'état liquide et la vapeur à l'état gazeux peuvent coexister ensemble. C'est-à-dire qu'on obtient la vapeur d'eau saturée lorsque la vitesse de vaporisation de l'eau est égale à celle de sa condensation. [18]

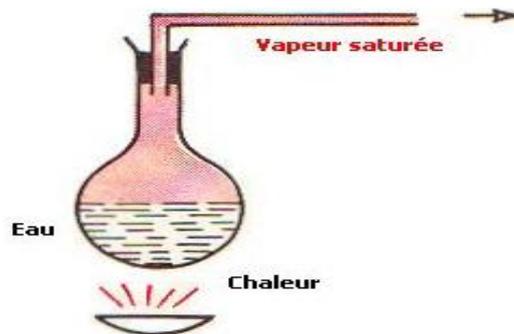


Figure II.32 : Vapeur d'eau saturée. [11]

Pour la vaporisation complète de l'eau, il faut lui communiquer :

- La chaleur sensible ( $q_{sens}$ ) qui élèvera sa température jusqu'à la température d'ébullition.
- La chaleur latente ( $q_{lat.}$ ) qui transforme l'eau en vapeur sans changement de température.

$$\lambda = q_{sens} + q_{lat} \quad (II.23)$$

$\lambda$  : quantité de chaleur en kcal/kg

**II.5.1.1. Formule de Regnault :**

La formule de Regnault permet de déterminer la chaleur contenue dans un kg de vapeur:

$$\lambda = 606 + 0.305 \cdot t \quad (\text{II.24})$$

Où :

$\lambda$  : quantité de chaleur en kcal/kg

t : température d'ébullition en °C

La formule de Regnault n'est pas exacte dans toute l'étendue des pressions. Elle ne se vérifie que jusqu'à 20 bars. Au-delà il faut avoir recours à des tables de vapeur dont nous donnons, Ci-dessous un extrait.

Température En °C	Pression En Bar	Chaleur sensible Kcal/kg	Chaleur Latente Kcal/kg	Chaleur totale Kcal/kg	Remarque
0	0,006	0	595	595	Regnault valable
50	0,12	50	568	618	
100	1,03	100	539	639	
150	4,9	151	505	656	
200	16	204	464	668	
250	40	260	410	670	Regnault non valable
300	88	322	336	658	
350	168	404	213	617	
374	225	501	0	501	État critique

**Tableau II.04 : un extrait de table de vapeur.**

### II.5.1.2. Avantages d'utiliser la vapeur d'eau saturée comme source de chaleur :

La vapeur d'eau saturée est une source idéale de chaleur, surtout pour le chauffage à des températures supérieures à 100 °C (212°F). Voici certaines des propriétés qu'elle a à offrir :

Propriété	Avantage
Chauffage rapide et uniforme à l'aide de la chaleur latente	Amélioration de la qualité du produit et de la productivité
La pression contrôle la température	Possible d'établir la température désirée rapidement et précisément
Coefficient de transmission de chaleur élevé	Surface de transmission de la chaleur plus petite que l'eau chaude, réduisant les coûts d'installations
Provient de l'eau	Sécuritaire, propre et peu coûteux

**Tableau II.05: Avantages d'utiliser la vapeur d'eau saturée comme source de chaleur.**

### II.5.2. Vapeur humide :

C'est la forme de vapeur la plus communément vue en usine. La vapeur produite par une chaudière contient normalement un certain degré d'humidité à cause de fines gouttelettes d'eau qui sont emportées avec la vapeur. Même les meilleures chaudières produisent souvent de la vapeur avec un degré d'humidité de 3% à 5%.

Lorsque l'eau atteint son point de saturation et commence à se vaporiser, il y a normalement une certaine partie de cette eau qui est entraînée avec le courant de vapeur sous la forme de fines gouttelettes. C'est une des raisons pour lesquelles on utilise la séparation comme méthode d'évacuation de condensât dans les lignes de distribution de vapeur.

#### II.5.2.1. Le teneur en vapeur :

Le titre permet d'exprimer le taux d'humidité de la vapeur saturée. Nous verrons plus tard que de l'eau à l'état de fines gouttelettes peut être entraînée dans le courant de vapeur à la sortie de la chaudière. Plus la vapeur saturée sera humide, moins elle sera intéressante d'un point de vue énergétique. D'autre part, l'eau contenue dans la vapeur saturée aura des effets destructeurs sur l'installation. Le titre (noté X) est donc défini de la manière suivante :

$$X = \frac{\text{poids de la vapeur}}{\text{poids total du mélange (liquide + vapeur)}} \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (\text{II.25})$$

S'il y a vapeur d'eau seulement, la vapeur est dite sèche (saturée sèche) : Son titre  $X = 1$

La vapeur saturée est dite humide quand son titre est inférieur à 1. Une vapeur saturée humide contient moins d'enthalpie qu'une vapeur saturée sèche. Parce qu'une vapeur dont le titre est de 0,95 contient 5,0 % d'eau, elle ne contiendra pas toute l'enthalpie indiquée dans la table de la vapeur saturée, mais seulement 95 %. Une vapeur saturée humide transporte et cède moins de chaleur qu'une vapeur saturée sèche. [19]

### II.5.2.2. Enthalpie spécifique de vapeur humide :

L'enthalpie spécifique de l'eau liquide saturée ( $x = 0$ ) et de la vapeur sèche ( $x = 1$ ) peut être extraite des tables de vapeur. En cas de vapeur humide, l'enthalpie réelle peut être calculée avec la qualité de la vapeur  $x$  et les enthalpies spécifiques d'eau liquide saturée et de vapeur sèche :

$$h_{humid} = x \cdot h_v + (1 - x) \cdot h_l \quad (\text{II.26})$$

Où :

$h_{humid}$  : Enthalpie de vapeur humide (J / kg)

$h_v$  : Enthalpie de vapeur « sèche » (J / kg)

$h_l$  : Enthalpie d'eau liquide saturée (J / kg)

Comme on peut le constater, la vapeur humide aura toujours une enthalpie inférieure à la vapeur sèche.

### II.5.2.3. Entropie spécifique de vapeur humide :

De même, l'entropie spécifique de l'eau liquide saturée ( $x = 0$ ) et de la vapeur sèche ( $x = 1$ ) peut être choisie dans les tables de vapeur. En cas de vapeur humide, l'entropie réelle peut être calculée avec la qualité de la vapeur,  $x$ , et les entropies spécifiques de l'eau liquide saturée et de la vapeur sèche :

$$s_{humid} = x \cdot s_v + (1 - x) \cdot s_l \quad (\text{II.27})$$

Ou :

$s_{humid}$  : Entropie de vapeur humide (J / kg K)

$s_v$  : Entropie de vapeur « sèche » (J / kg K)

$s_l$  : Entropie d'eau liquide saturée (J / kg K)

### II.5.2.4. Volume spécifique de vapeur humide :

De même, le volume spécifique d'eau liquide saturée ( $x = 0$ ) et de vapeur sèche ( $x = 1$ ) peut être sélectionné dans les tables à vapeur. En cas de vapeur humide, le volume spécifique réel peut être calculé avec la qualité de la vapeur,  $x$ , et les volumes spécifiques d'eau liquide saturée et de vapeur sèche :

$$v_{humid} = x \cdot v_v + (1 - x) \cdot v_l \quad (\text{II.28})$$

Où

$v_{humid}$  : Volume spécifique de vapeur humide ( $\text{m}^3 / \text{kg}$ )

$v_v$  : Volume spécifique de vapeur « sèche » ( $\text{m}^3 / \text{kg}$ )

$v_l$  : Volume spécifique d'eau liquide saturée ( $\text{m}^3 / \text{kg}$ )

### II.5.3. Vapeur surchauffée :

La vapeur d'eau surchauffée est obtenue en chauffant la vapeur d'eau sèche (saturée) ou humide au-delà de son point de saturation. Ainsi, la température de la vapeur surchauffée est supérieure à celle de la vapeur saturée alors que sa masse volumique est inférieure à celle-ci pour une même pression.

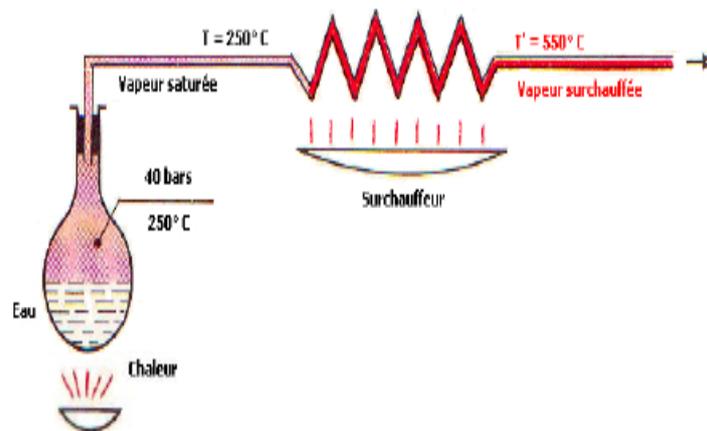


Figure II.33 : Vapeur surchauffée [11]

La vapeur d'eau surchauffée est surtout utilisée à des fins motrices comme dans les turbines, et n'est pas habituellement utilisée comme source de chaleur.

Chaleur totale de la vapeur surchauffée :

$$Q = q_{sens} + q_{lat} + q_{sur} \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$$q_{sur} = C_p \cdot (\hat{T} - T) \quad (\text{II.29.1})$$

### **II.5.3.1. Avantages d'utiliser la vapeur surchauffée pour entraîner une turbine :**

Aide à maintenir les installations sèches lorsque leur performance pourrait être affectée par la présence de condensât.

Améliore l'efficacité thermique et la charge de production, ex. pour obtenir un plus gros changement de masse volumique à l'état surchauffé à pressions basses ou sous vide.

Il est avantageux de fournir et d'évacuer la vapeur à l'état surchauffé pour empêcher la formation de condensât à l'intérieur des installations utilisant la vapeur surchauffée (en situation d'opération normale).

Ceci diminue les risques de dommages causés par l'érosion ou la corrosion due à l'acide carbonique. De plus, augmenter le degré de surchauffe et la pression fait accroître l'enthalpie à l'entrée de la turbine, ce qui fait augmenter l'efficacité thermique théorique de la turbine puisqu'elle est calculée en utilisant les valeurs d'enthalpie à l'entrée et à la sortie de la turbine.

### **II.5.3.2. Désavantages d'utiliser la vapeur surchauffée pour chauffer :**

C'est donc pour ces raisons et pour plusieurs autres qu'il est préférable d'utiliser la vapeur saturée au lieu de la vapeur surchauffée comme source de chaleur dans les échangeurs de chaleur.

Propriété	Désavantage
Coefficient de transmission de chaleur plus bas	Productivité réduite
	Nécessité d'une plus grande surface de transmission de la chaleur
Pour une même pression, la température de la vapeur n'est pas nécessairement uniforme	La vapeur surchauffée doit être maintenue à une vitesse élevée pour empêcher les pertes de chaleur
Chauffage avec la chaleur sensible	Les chutes de température peuvent avoir un effet néfaste sur la qualité du produit
La vapeur surchauffée peut atteindre des températures très élevées	Les installations nécessitent des matériaux plus robustes, ce qui augmente les coûts d'installation

**Tableau II.06: Désavantages d'utiliser la vapeur surchauffée pour chauffer.**

En revanche, la vapeur surchauffée peut parfois avoir ses utilisations comme source de chaleur directe pour les procédés demandant des températures très élevées puisque, contrairement à l'air, elle peut fournir de la chaleur en l'absence d'oxygène. L'utilisation de la vapeur surchauffée pour la cuisson ou le séchage dans les procédés alimentaires fait aussi l'objet de recherches. [8]

#### II.5.4. Eau supercritique :

L'eau supercritique désigne de l'eau au-delà de son point critique : 22.1MPa, 374 °C [3208 psi à, 705°F]. Au point critique, la chaleur latente de l'eau devient nulle. De plus, sa masse volumique ne change pas, qu'elle soit à l'état liquide ou gazeux. Ainsi, lorsque l'eau se trouve à une température et à une pression plus élevée que son point critique, il est impossible de distinguer si elle est à l'état liquide ou gazeux.

L'eau supercritique est utilisée pour entraîner les turbines de certaines centrales électriques qui demandent un niveau d'efficacité supérieur à celui que peut offrir la vapeur.

De plus, des recherches sont en train d'être effectuées sur l'eau supercritique en tant que fluide ayant les propriétés à la fois d'un liquide et d'un gaz, en particulier sur sa capacité d'agir comme solvant pour les réactions chimiques. [20]

#### II.5.5. Eau liquide :

Maintenant les variables d'état (macroscopiques) d'un liquide sont assez trivialement son volume  $V$ , sa pression  $P$  et sa température  $T$ . Son équation d'état peut alors par exemple se mettre aussi sous la forme :

$$V = f(T, P) \quad (\text{II.30})$$

Sous forme différentielle cela donne :

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \cdot dT + \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T \cdot dP \quad (\text{II.30.1})$$

En introduisant les coefficients thermo-élastiques comme nous l'avons déjà fait plus haut, il vient :

$$\frac{dV}{V} = \alpha_{V,P} \cdot dT + \chi_T \cdot dP \quad (\text{II.30.2})$$

L'expérience montre que pour les liquides, les coefficients thermo-élastiques varient très peu avec la température et la pression. On peut donc les supposer constants, pourvu que les variations de la température et de la pression restent modérées. Comme par ailleurs les variations de volume d'un liquide sont très faibles, nous pouvons faire la même approximation. C'est-à-dire que :

$$\frac{dV}{V} \cong \frac{dV}{V_0} \quad (\text{II.30.3})$$

Où  $V_0$  est le volume de référence constant. Compte tenu de ces remarques, nous obtenons trivialement par intégration l'équation d'état générale d'un liquide :

$$V(T, P) = V_0 \cdot [1 + \alpha_{V,P} \cdot (T - T_0) - \chi_T \cdot (P - P_0)] \quad (\text{II.30.4})$$

Remarquons que l'approximation d'un fluide incompressible, très utilisée en mécanique des fluides, consiste à supposer que :  $\alpha_{V,P} = 0, \chi_T = 0$

L'équation d'état du liquide devient alors :  $V(T, P) = V_0 = cst$  (II.30.5)

Indiquons aussi que dans les petites classes, les solides sont considérés comme des liquides incompressibles. On a alors la fameuse relation connue de nombreux écoliers :

$$V = V_0 \cdot [1 + \alpha_{V,P} \cdot (T - T_0)] \quad (\text{II.30.6})$$

Ou autrement écrit :

$$\Delta V = \alpha_{V,P} \cdot V_0 \cdot \Delta T \quad (\text{II.30.7})$$

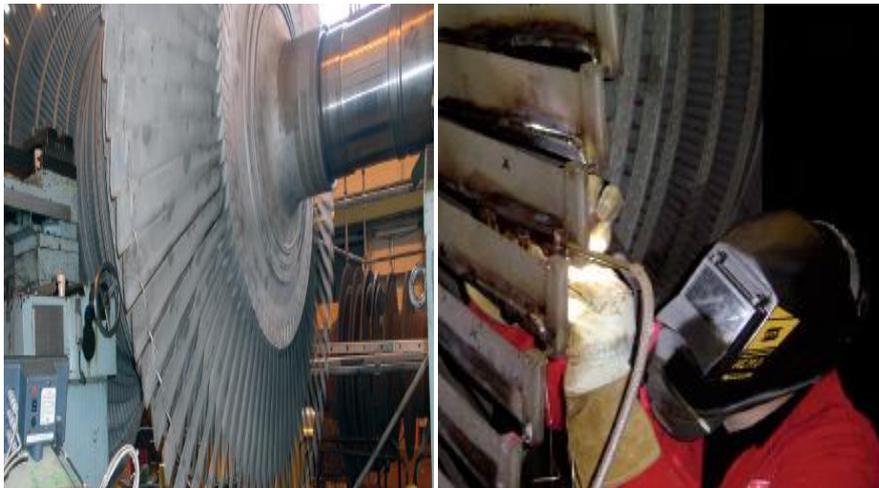
Ces deux dernières relations sont exactement les mêmes que la formulation technique de loi Gay-Lussac pour les gaz. [21]

## **II.6. Maintenance de la turbine à vapeur :**

La maintenance a principalement pour but de réduire le temps d'arrêt des équipements qui coûte cher, ce qui permet de limiter les pertes de production et de réduire les coûts de maintenance. Parmi les problèmes majeurs rencontrés dans les turbines à vapeur on trouve :

Les aubes de turbine à vapeur basse pression ont besoin d'être réparées fréquemment en raison de dommages provoqués par les mauvaises conditions de vapeur, la perte de plaque anti érosion brasées ou de dommages provoqués par des corps étrangers. Ces aubes peuvent être en principe entièrement réparées en toute sécurité sur site ou en atelier, avec jusqu'à 50% de remplacement du profil externe, comprenant souvent :

- Le remplacement des plaques de protection et du bord d'attaque (stellite)
- La réparation par soudure de section endommagée du bord de fuite
- Le remplacement complet des extrémités
- Le remplacement/ la remise en état de tenons.
- Le repositionnement d'amortisseurs et réinstallation de fils de liaison



**Figure II.34: Maintenance de turbine à vapeur [34]**

- Réparation des diaphragmes et de tuyère : permet de réparer/ remettre en condition pour remplacer entièrement les ailettes ou les segments de profils externes, y compris :
- La réparation par soudure d'ailettes/ de séparation.
- Le remplacement de segment d'ailette.
- Le remplacement et la réparation de bagues internes, externes.
- La réparation et la modification de goupille de positionnement.
- Le remplacement de joint. [22]

*Chapitre III :*  
*L'étude de cas*

### III.1. Description générale de la centrale thermique :

Le projet Shariket Kahraba Terga est une centrale électrique à cycle combiné implantée à Terga sur le site de la commune d'Ouled Boujemaa Wilaya de Ain Témouchent, Algérie, Afrique. Le démarrage de la centrale d'une puissance nominale de 1200 MW. La centrale se compose de trois unités mono-arbre KA26-1, sa conduite est réalisée par l'opérateur en fonction des demandes du gestionnaire du réseau électrique. [1]

La centrale électrique à cycle combiné proposée se compose de trois (3) unités « single shaft » KA26-1 de dernière technologie. Chaque machine « single shaft » se compose de :

- Une turbine à gaz (TG) industrielle de grande puissance ALSTOM type 26 équipée d'un système de combustion séquentielle à prémélange pauvre et faibles émissions de NOx.
- Un cycle eau / vapeur à triple pression de réchauffage avec chaudière de récupération
- Une turbine à vapeur (TV) deux corps à triple pression de réchauffage avec corps double Installé sur un plancher
- Un alternateur refroidi à l'H<sub>2</sub>, commun à la TG et à la TV. [2]

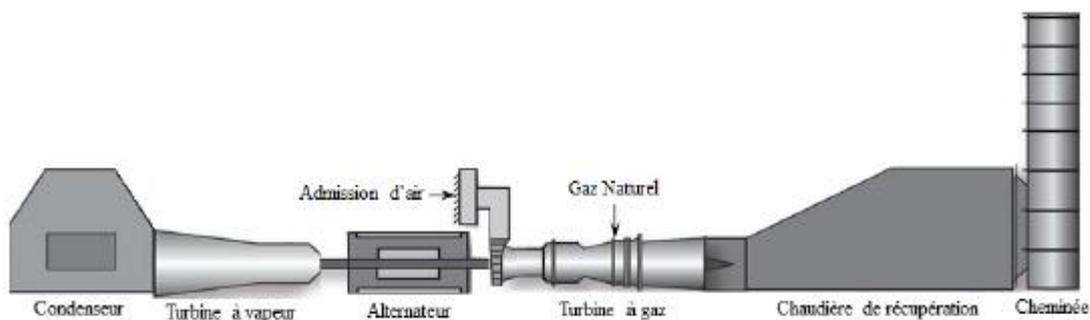


Figure III.01 : Schéma de d'une unité cycle combiné a single shaft. [1]

### III.2. Turbine à vapeur :

La turbine à vapeur possède deux corps, trois niveaux de pressions, et une resurchauffe. Le premier corps est l'étage haut pression (HP) et le deuxième est à double flux, se compose des étages moyens pression (MP) et basse pression (BP). Les rotors des corps HP et MP/BP sont liées entre eux par un accouplement rigide. Le rotor HP est également lié à l'embrayage par un accouplement rigide. [1]

La turbine à vapeur est conçue pour être utilisée avec une turbine à gaz au sein d'une centrale électrique à cycle combiné. Le débit massique provenant de la chaudière de

récupération (HRSG), comprenant un débit haute pression (HP), à pression intermédiaire (MP) et basse pression (BP) alimente la turbine à vapeur. Cette unité à un arbre, possédant un alternateur commun situé entre les turbines à gaz et à vapeur, permet d'obtenir des dimensions de bâti de machine avantageuses, voir fig. 2.

Le système d'huile de graissage/hydraulique de cette unité à un arbre est combiné avec le bloc des auxiliaires et couvre les demandes de l'ensemble de la ligne d'arbre, qui comprend la turbine à gaz, l'alternateur et la turbine à vapeur.[2]

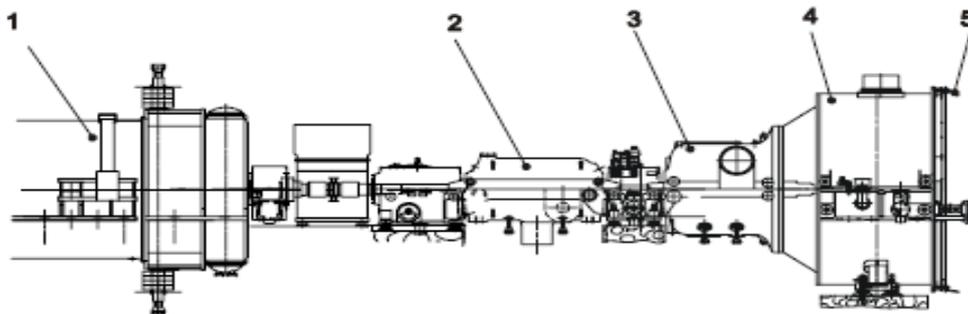


Figure III.02 : Turbine à vapeur ALSTOM. [.2]

1. Alternateur.
2. Turbine haute pression.
3. Turbine à pression intermédiaire.
4. Turbine basse pression.
5. Dôme du condenseur.

### III.3. GROUPES PRINCIPAUX DE LA TURBINE A VAPEUR :

#### III.3.1. Turbine HP :

La turbine HP à simple flux est de type à double enveloppe moulée et est constituée d'une enveloppe extérieure, d'une enveloppe intérieure à ailettes avec piston d'équilibrage et section d'admission de la vapeur, de joints d'arbre et d'un rotor à ailettes. Le corps de vanne est fixé par des brides à l'enveloppe extérieure.

#### III.3.2. Turbine MP :

La turbine MP à simple flux est constituée d'une enveloppe extérieure moulée, d'une enveloppe intérieure moulée à ailettes avec piston d'équilibrage et section d'admission de la vapeur et d'un joint d'arbre. Les turbines PI et BP ont un rotor à ailettes commun. L'enveloppe extérieure possède une bride transversale pour un montage à bride de l'enveloppe extérieure BP ;

l'enveloppe intérieure est disposée dans le flux opposé, par rapport à la turbine BP. Les corps de la vanne d'interception sont bridés à l'enveloppe extérieure ; la vapeur secondaire est conduite directement dans l'enveloppe extérieure, via un tuyau d'admission.

### **III.3.3. Turbine BP :**

La turbine BP à simple flux avec un échappement axial est constituée d'une enveloppe extérieure soudée, d'un support d'ailettes en fonte, monté par crochet dans l'enveloppe extérieure, d'un joint d'arbre et d'un collet d'échappement. L'enveloppe extérieure possède une bride transversale pour le montage à bride de la turbine PI.

Le collier d'échappement est raccordé au condenseur principal par un collier flexible.

### **III.3.4. Condenseur principal :**

Le condenseur disposé axialement, conçu pour un cycle fermé est une construction soudée avec tuyaux de refroidissement par eau, droits et insérés, de type faisceaux multiples, avec collecteur complet et réservoirs d'eau. Le condenseur est équipé d'un puits de recueil pour recevoir le condensat accumulé.

### **III.3.5. Réservoir d'eau d'alimentation :**

Le réservoir d'eau d'alimentation avec dégazeur à contact direct intégré est une construction soudée et sert de réservoir de réserve pour le cycle eau/vapeur complet de la turbine à vapeur.

La vapeur extraite de la turbine BP est amenée directement dans le dégazeur.

### **III.3.6. Condenseur de vapeur de barrage :**

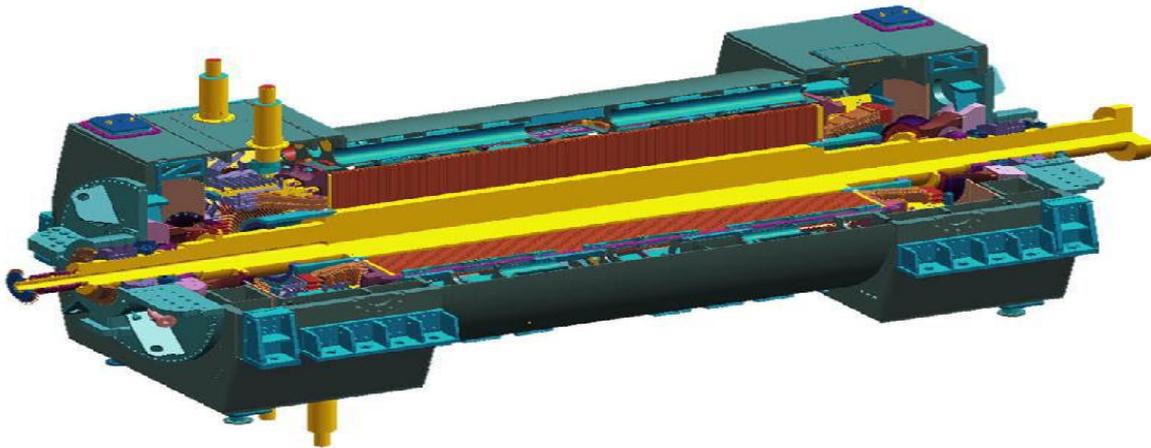
Le condenseur de vapeur de barrage est une construction soudée avec tubes de refroidissement droits refroidis par condensat, insérés dans les plaques tubulaires, le puits de recueil intégré et les boîtes à condensat. Un ventilateur monté aspire le mélange vapeur/air des systèmes de joint d'arbre de la turbine à vapeur et l'évacue vers l'atmosphère.

### **III.3.7. Bloc des auxiliaires :**

Tous les composants de la turbine à vapeur tels que les filtres, les refroidisseurs et les pompes pour les alimentations en huile de graissage, de soulèvement et en huile hydraulique ainsi que l'équipement de commande et de sécurité associé sont montés ou fixés sur le bloc des auxiliaires. Les agents de graissage et de pression sont distribués au moyen de tuyaux qui sont séparés pour chaque système. [2]

**III.3.8. Alternateur :**

L'alternateur est un alternateur Alstom type **50WT21H-120** (Figure III-3) à trois phases et deux pôles synchrones. Il est entraîné à la fois par la turbine à gaz et la turbine à vapeur via un accouplement rigide à embrayage. Son refroidissement est assuré par l'hydrogène qui est à son tour refroidi dans les échangeurs à eau à circuit fermé se trouvant dans l'enceinte de l'alternateur. [1]



**Figure III.03 :** Alternateur type 50WT21H-120 [2]

### III.4. Cycle d'installation du central thermique combiné CC :

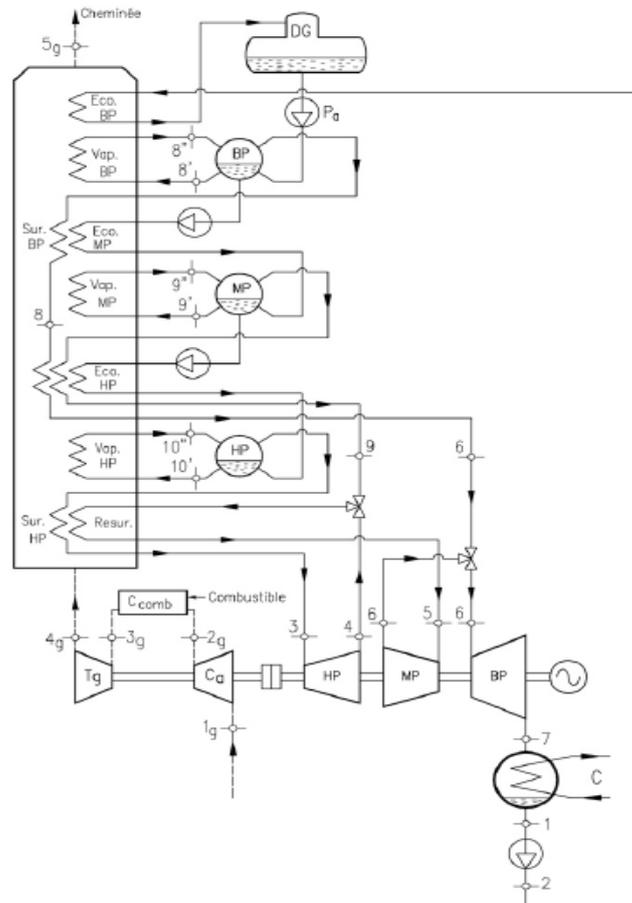


Figure III.04: Cycle à vapeur dans une installation TGV à 3 niveaux de pression [3]

#### III.4.1. Explication du cycle :

Dans un cycle **TGV**, les fumées chaudes sortant de la turbine à gaz sont récupérées pour remplacer l'action calorifique de combustion dans un cycle à vapeur. Le concept de **TGV** combine ainsi un cycle à vapeur et un cycle à gaz. La turbine à gaz délivre à la chaudière de récupération a trois niveaux de pression a une température de 600.

La turbine à vapeur associée est composée de trois corps : haute pression (**HP**), moyenne pression (**MP**) et basse pression (**BP**).

La vapeur **HP** surchauffée est produite par la chaudière de récupération a une grande environ de 500 à 570 °C, cette température quitte le corps **HP** a la pression **MP**, et a une température d'environ 340 à 350 °C.

La vapeur quittant le corps **HP** est ensuite resurchauffée dans la chaudière de récupération, pour retrouver la même température de la première température surchauffe état 3.

Ce débit de vapeur resurchauffée est mélangé au débit de vapeur de la boucle **MP** issus de la chaudière, à la même température. La vapeur pénètre dans l'enveloppe intérieure **MP** où elle se dilate dans les ailettes. Le sens de la vapeur dilatée est inversé dans la turbine **MP** ; la vapeur se dirige alors vers la turbine **BP** située dans la même enveloppe.

Cette inversion du sens permet d'obtenir un équilibrage des poussées axiales dans la turbine combinée **MP/ BP**

La vapeur **BP** qui est également produite par la chaudière de récupération circule comme vapeur secondaire à travers un tuyau d'admission, constitué d'une vanne d'isolement papillon et d'une vanne de régulation papillon avant de rejoindre l'enveloppe extérieure **MP**.

La vapeur partiellement dilatée, provenant de la turbine **MP** continue à se dilater, mélangée à la vapeur **BP** admise dans la turbine **BP** et arrive finalement dans le condenseur disposé axialement, une fois que la dilatation est terminée. [3]

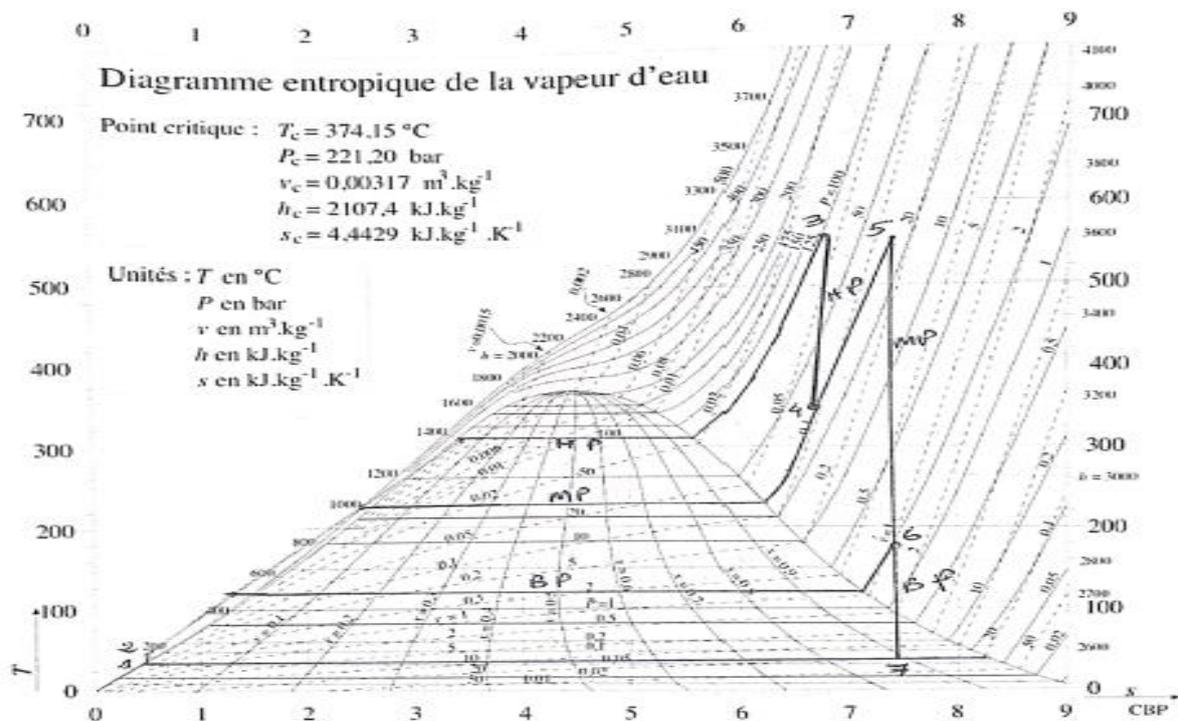


Figure III.05 : Cycle à vapeur dans une installation TGV à Trois niveaux de pression

### III.5. Description de système :

Dans ce travail, on a va prendre un cas d'étude proche au cas d'étude du central thermique de SKT, Un exemple qui basé sur le cycle de Rankine à resurchauffe à deux niveaux de pression. Ce cycle contient deux processus de détente et un de compression.

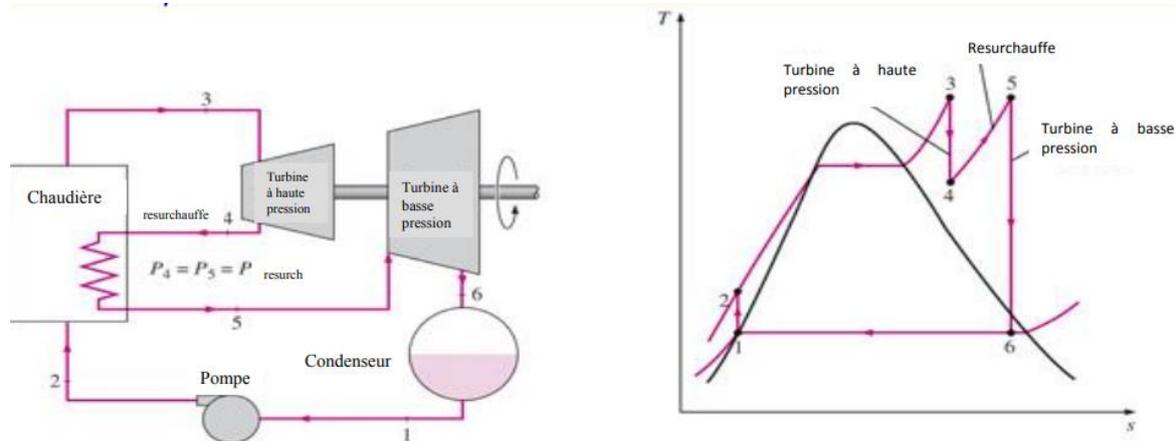


Figure III.06 : Cycle à vapeur étudié. [4]

On a utilisé le même paramètre de cycle de la centrale thermique SKT, la différence entre les deux cycles est de prendre deux niveaux de pression (HP, BP) au lieu de trois niveaux (HP, MP, BP,) et deux turbine (HP, BP) au lieu de trois (HP, MP, BP), et un seul débit au lieu de trois débits massiques.

#### III.5.1. Hypothèses simplificatrices :

Pour effectu le bilan énergétique de ce modèle de turbine à Vapeur, on adapte les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le fluide caloporteur a l'entrée de la pompe est un liquide saturé (point 1)
- La perte de pression dans les échangeurs (Chaudière, réchauffeur et condenseur) est négligeable.
- La perte de chaleur dans les turbines et négligeable.

#### III.5.2. Modélisation de Cycle :

On effectue les bilans enthalpiques sur chaque composant échangeant de la chaleur ou du travail avec le milieu extérieur.

- **Dans l'évolution 1 → 2** : compression isentropique du liquide saturé. Le travail fourni par la pompe est :

$$W_p = h_2 - h_1 \quad (III.1)$$

Le point 1 se trouver dans la ligne de liquide saturé, on peut trouver sa pression en fonction de sa température en utilisant l'équation suivant [4] :

$$p_{eq} = 22062. \exp(\alpha) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$p_{eq}$  : La pression d'équilibre en kPa

Et :

$$\alpha = \frac{T_c}{T} \cdot \sum_i^n A_i \cdot \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{B_i} \quad (\text{III.2.1})$$

T : La température d'équilibre en K.

$T_c$  : La température du point critique ( $T_c = 647,14$ ).

Les constants  $A_i$  et  $B_i$  sont résume dans le tableau ci-dessous ;

$i$	$A_i$	$B_i$
1	-7,86E+00	1,0
2	1,84E+00	1,5
3	-1,18E+01	3,0
4	2,27E+01	3,5
5	-1,59E+01	4,0
6	1,78E+00	7,5

**Tableau III-01 : Les coefficients de l'équation de la pression d'équilibre.**

Pour l'enthalpie du point 1, on peut trouver à partir de l'équation suivant [4] :

$$h_l = \delta - \frac{p_{eq}}{\gamma} \cdot (\alpha - \beta) \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$$\delta = \sum_i^n C_i \cdot \left(\frac{T}{T_c}\right)^{D_i} \quad (\text{III.3.1})$$

$$\gamma = 322 \cdot \sum_i^n E_i \cdot \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{F_i} \quad (\text{III.3.2})$$

$$\beta = \sum_i^n A_i \cdot B_i \cdot \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{B_i-1} \quad (\text{III.3.3})$$

Les constants  $C_i$ ,  $D_i$ ,  $E_i$  et  $F_i$  sont résume dans le tableau ci-dessous ;

i	C <sub>i</sub>	D <sub>i</sub>	E <sub>i</sub>	F <sub>i</sub>
1	-1135,48161	0,0	1	0
2	-5,72E-08	-19,0	1,99506	0,33
3	2689,81	1,0	1,10123	0,67
4	129,889	4,5	-5,13E-01	1,67
5	-137,181	5,0	-1,75263	5,33
6	9,69E-01	54,5	-45,4485	14,33
7			-6,76E+05	36,67

**Tableau III-02 : Les coefficients de l'équation de l'enthalpie de liquide saturé.**

Le point 2 se trouve dans le régent de liquide comprimé, la formule la plus approchée utilisée pour calculer son enthalpie est :

$$h_2 = h_1 + v_1 \cdot (p_2 - p_1) \quad (\text{III.4})$$

Avec  $v_1$  le volume massique de point 1 (liquide saturé) calculer en fonction de l'équation suivant [5] :

$$v_l = \frac{1+B \cdot t + D \cdot t^2 + F \cdot t^3 + H \cdot t^4}{A + C \cdot t + E \cdot t^2 + G \cdot t^3} \quad (\text{III.5})$$

$t$  : est la température d'équilibre en °C. Et les coefficients de A à H trouver dans le tableau ci-dessous :

A	-4,38E-04	E	-5,96E-06
B	-6,95E-03	F	-4,23E-08
C	7,66E-04	G	2,87E-07
D	2,42E-05	U	2,59E-11

**Tableau III-03 : Les coefficients de l'équation de volume massique de liquide saturé.**

- **Dans l'évolution 2 → 3** : apport de chaleur à pression constante par le biais de la chaudière. Ce processus génère du vapeur surchauffé.

$$Q_{ch} = h_3 - h_2 \quad (\text{III.6})$$

Le point 3 se trouve dans le régent de la vapeur surchauffé, on peut calculer son enthalpie en fonction de deux paramètres (température et pression généralement) à l'aide de l'équation suivante [5] :

$$h_{sur} = h_c \sum_k^N a_k (T_c/T)^{m_k} (p/p_c)^{n_k} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$h_c$  : Enthalpie du point critique ( $h_c = 2086 \text{ kJ/kg}$ ).

$p_c$  : La pression critique ( $p_c = 22.055 \text{ MPa}$ ).

Les coefficients  $a_k$ ,  $m_k$  et  $n_k$  se trouvant dans le document [5]

- **Dans l'évolution 3 → 4** : la vapeur surchauffée est détendue d'une manière à un mélange saturé. Le travail fourni par la turbine 1 est :

$$W_{t1} = h_4 - h_3 \quad (\text{III.8})$$

Le point 4 soit dans le régent mélange ou dans le régent surchauffé, ça positions dépend de la valeur de  $s_4$  qu'est égale à  $s_3$  (détente adiabatique dans la turbine) et la pression moyenne. Pour trouver la valeur de  $s_3$  en utilise l'équation suivant [5] :

$$S_{sur} = S_c - c_p \ln \left( \frac{T_c}{T} \right) - \left( \frac{c_p}{4} \right) \ln \left( \frac{p}{p_c} \right) + \sum_k^N a_k (T_c / T)^{m_k} (p / p_c)^{n_k} \quad (\text{III.9})$$

Avec :

$s_c$  : l'entropie de point critique en  $\text{kJ/kg.K}$ .

Si l'entropie du point 4 supérieur à la valeur de l'entropie du point de vapeur saturé corisphant à pression moyenne ( $s_4 > s_v(P_M)$ ), le point 4 se trouve à le regént de surchauffie. Par contre, Si  $s_4 < s_v(P_M)$  la position du point 4 est dans le régent humide (mêlangé). Le cas exceptionnel si  $s_4 = s_v(P_M)$  donc le fluide dans le point 4 est un vapeur saturé.

L'entropie de vapeur saturé est calculée par l'équation suivant :

$$s_v = \exp \left( a + b. [\ln(1/T_r)]^{0.35} + \frac{c}{T_r^2} + \frac{d}{T_r^4} + \frac{e}{T_r^5} \right) \quad (\text{III.9.1})$$

Avec :  $T_r$  la température réduit égale la température sur la température critique :

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (\text{III.9.2})$$

Les coefficients d'a à e sont présentés dans le tableau III-04.

a	1,48E+00
b	5,32E-01
c	-1,92E-02
d	2,97E-02
e	-8,02E-03

Tableau III-04 : Les coefficients de l'équation de l'entropie de vapeur saturé.

Pour calculer l'enthalpie de point 4, on a deux cas :

**Cas 1 :**  $s_4 \leq s_v(P_M)$  le point 4 dans le mélange :

$$h_m = x_m \cdot h_v(P_M) + (1 - x) \cdot h_l(P_M) \quad (\text{III.10})$$

Pour la vapeur saturée :

$$h_v = \delta - \frac{P_{eq}}{\gamma_v} \cdot (\alpha - \beta) \quad (\text{III.10.1})$$

Avec :

$$\gamma_v = 322 \cdot \exp(\sum_i^n G_i \cdot \tau^{H_i}) \quad (\text{III.10.2})$$

Le titre  $x$  est calculé en fonction de l'entropie :

$$x = \frac{s_4 - s_l}{s_v - s_l} \quad (\text{III.11})$$

**Cas 2 :**  $s_4 > s_v(P_M)$  le point 4 ce trouvé dans le régent de vapeur surchauffé. On peut calculer l'enthalpie à l'aide de l'équation suivant [6] :

$$h_{sur} = h_c \sum_K^N a_k \cdot [\exp[m_k(S - S_C) / c_p] - 1]^{m_k/2} \cdot (p / p_c)^{n_k/4} \quad (\text{III.12})$$

- **Dans l'évolution 4 → 5 :** le fluide à la sortie de la première turbine entre dans le resurchauffeur. La chaleur fournie dans cette phase égale à :

$$Q_{res} = h_5 - h_4 \quad (\text{III.13})$$

L'enthalpie du point 5 est calculée de la même manière que le point 3.

- **Dans l'évolution 5 → 6 :** la vapeur surchauffée est détendue d'une manière à un mélange saturé. Le travail fourni par la turbine 2 est :

$$W_{t2} = h_6 - h_5 \quad (\text{III.14})$$

- **Dans l'évolution 6 → 1 :** évacuation de la chaleur à pression constante à travers le condenseur :

$$Q_{con} = h_1 - h_6 \quad (\text{III.15})$$

- Le rendement thermique du cycle est déterminé par :

$$\eta = \left| \frac{W_{net}}{Q_{ch}} \right| \quad (III.16)$$

- Le travail net est :

$$W_{net} = W_t + W_p = -(Q_{ch} + Q_{con}) \quad (III.16.1)$$

Ce module mathématique a été programmé sous le logiciel « Matlab » afin de faciliter les tâches de réputation de calcul.

### III.5.3. Interprétation des résultats :

Pour l'unité d'SKT qui génère 319 MW de puissance électrique, Les données de départ mentionnées dans le tableau ci-dessous sont utilisées initialement pour calculer le rendement.

Température à l'entrée du Corps HP	566 °C
Température à l'entrée du Corps BP	566 °C
Température à l'entrée de la pompe	38 °C
La pression à l'entrée du Corps HP	12,5Mpa
La pression à l'entrée du Corps BP	30 Mpa
La pression à l'entrée de la pompe	0.0074 Mpa
Le débit massique	72.3 kg/s

Tableau III-05 : Les données de départ.

Après le calcul du rendement d'après les données de départ on trouve qu'il égale à 44%. Et les paramètres dans chaque point représentés dans le tableau ci-dessous :

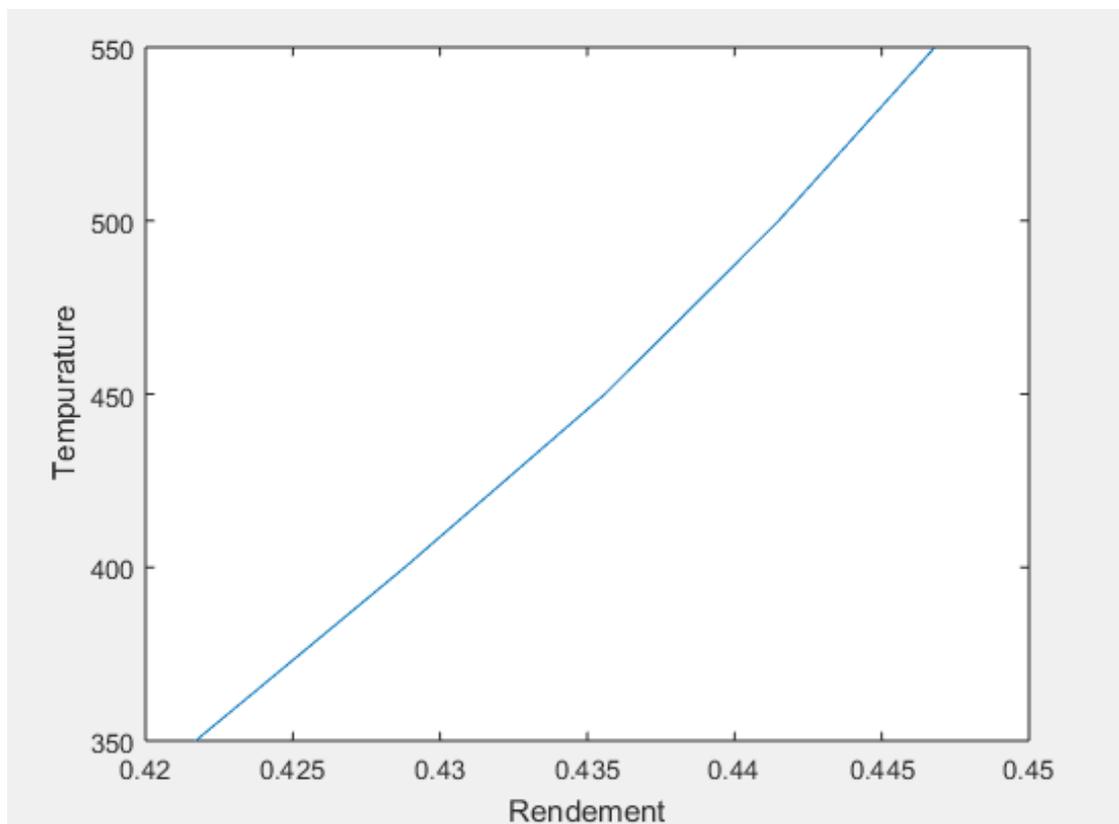
Point	T °C	P Bar	H kJ/kg	S kJ/kg.K	V m <sup>3</sup> /kg	
1	38	0.074	159.13	0.54562	0.0010078	Pompe
2	39	125	171.72	0.5538	0.0010020	
3	566	125	3516.6	6.6786	0.0285233	HP
4	334	30	3076.3	6.6786	0.0876084	
5	566	30	3605.2	7.4269	0.127010	BP
6	38	0.074	2321.1	7.4269	2.95953	

Tableau III-06 : Données thermodynamiques du point du cycle Rankine avec resurchauffe.

- ✓ **Etude de Cas 1** : étude de l'influence de changement de la température d'entré sur le rendement de la turbine. On Fixe la pression d'entré ( $P_3 = 125$  bar). Le résultat set montré dans le tableau ci-dessous.

Température [°C]	350	400	450	500	550
Rendement	0.4217	0.4288	0.4356	0.4415	0.4468

**Tableau III-07** : la variation de rendement en fonction de la température d'entrée à la turbine.



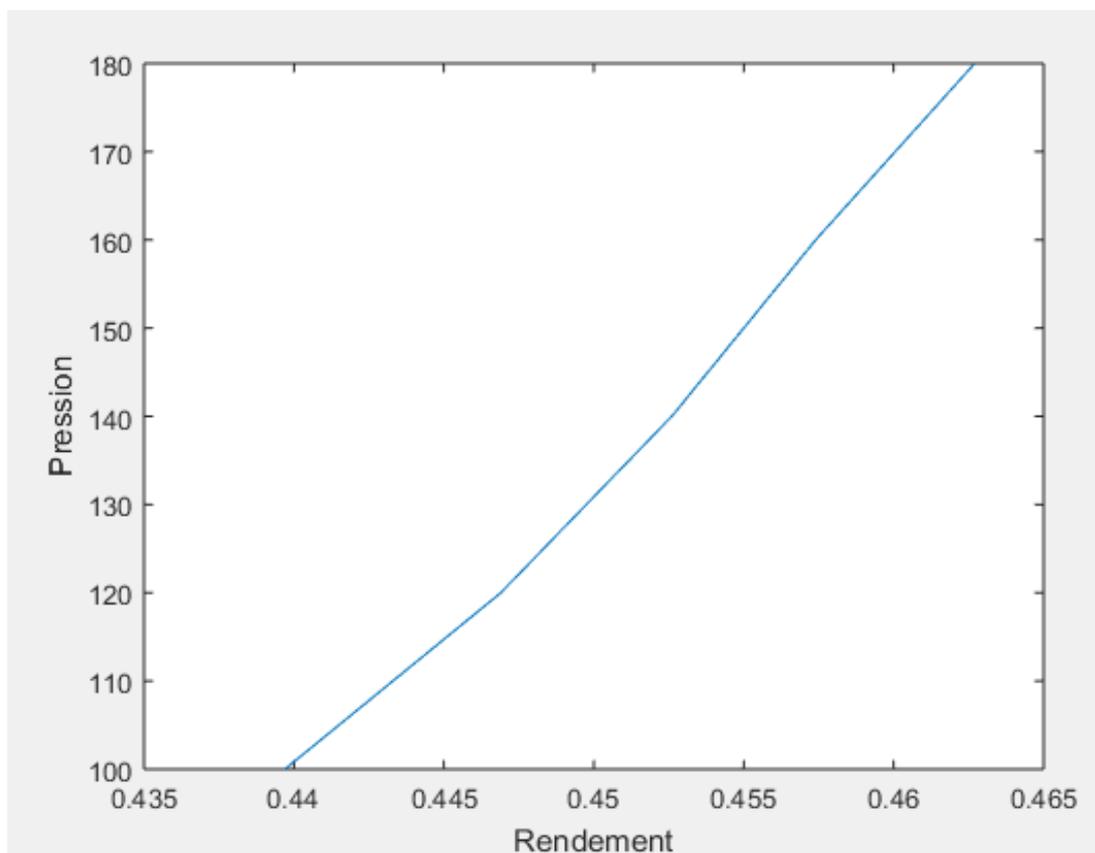
**Figure III.07** : Variation de Rendement par rapport à la température.

Le graphe suivant montre la variation du rendement par rapport à la température d'entrée de la turbine HP, on remarque que si on augmente la température, le rendement augmente, on peut expliquer cette augmentation par l'augmentation de la quantité de travail utile ( $WUT$ ), par rapport à la quantité de la chaleur ( $Q_{cycle}$ ).

- ✓ **Etude de Cas 2** : étude de l'influence de changement de la pression d'entrée sur le rendement de la turbine. On fixe la température d'entrée  $T_3$  (566 °C). Le résultat est montré dans le tableau ci-dessous.

Pression [bars]	100	120	140	160	180
Rendement	0.4397	0.4469	0.4526	0.4574	0.4627

**Tableau III-08** : la variation de rendement en fonction de la pression d'entrée à la turbine.



**Figure III.08** : Variation de Rendement par rapport à la pression.

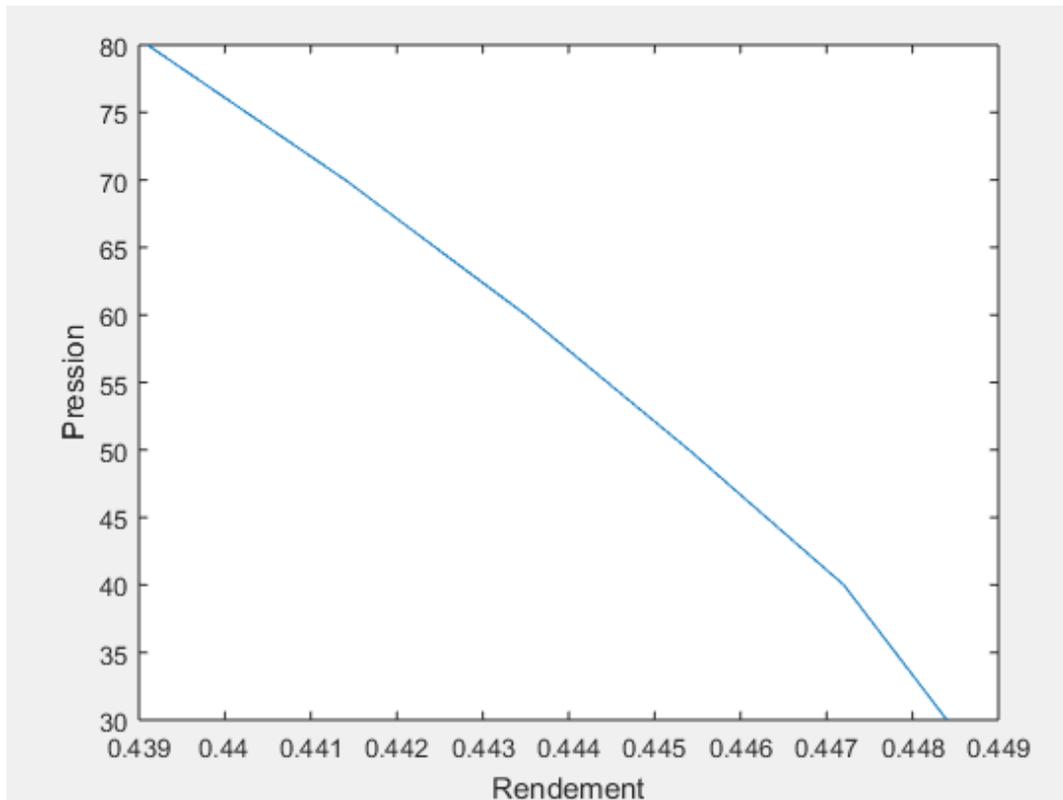
Le graphe suivant montre la variation du rendement par rapport à la pression d'entrée de la turbine HP, on remarque que si on augmente la pression, le rendement augmente, on peut expliquer cette augmentation par l'augmentation de la quantité de travail utile ( $W_{UT}$ ), par rapport à la quantité de la chaleur ( $Q_{cycle}$ ).

- ✓ **Etude de Cas 3** : étude de l'influence de changement de la pression  $P_4=P_5$  (Sortie HP, Entre BP) sur le rendement de la turbine. On fixe la température d'entre  $T_3$  en  $566\text{ °C}$  et la pression d'entré en  $P_3 = 125\text{ bar}$ . Le résultat est montré dans le tableau ci-dessous.

Pression [bars]	30	40	50	60	70	80
Rendement	0.4484	0.4472	0.4454	0.4435	0.4414	0.4391

**Tableau III-09** : la variation de rendement en fonction de la pression de sortie à la première turbine.

On trace le Diagramme :



**Figure III.09** : Variation du rendement par rapport la pression.

Le graphe suivant montre la variation du rendement de la turbine par rapport à la pression de (sortie de la turbine HP, entrée de la turbine BP), on remarque que si on augmente la pression, le rendement diminue, on peut expliquer cette diminution par la diminution de la quantité du travail utile ( $WUT$ ), par rapport à la quantité de la chaleur ( $Q_{cycle}$ ).

**Conclusion :**

Dans ce troisième chapitre on a présenté les calculs thermodynamiques de la turbine à vapeur et son cycle (cycle de Rankine a resurchauffe).et on a commencé par le calcul thermodynamique ce calcul est programmé en langage MATLAB. Le rendement du cycle de la turbine à vapeur est d'environ 44%.

# *Conclusion Générale*

### **Conclusion Générale :**

Dans cette étude, nous avons exploré les machines à turbine, plus précisément les turbines à vapeur, et leur principe de fonctionnement impliquant la création de couple par un écoulement fluide : la vapeur d'eau.

Pour mieux atteindre l'objectif de cette étude, il a fallu décortiquer les turbines à vapeur pour comprendre leur fonctionnement, quels sont leurs composants, etc.

L'objectif principal de cette étude est d'étudier les changements d'efficacité en termes de température et de pression

Nous avons écrit un algorithme sur le programme Matlab qui inclut toutes les étapes de l'état 1 d'entrée de la pompe à l'état 2 de sortie de la chaudière à la turbine puis au condenseur.

Les résultats obtenus ont montré que le facteur de température et de pression avec lequel la vapeur pénètre dans la turbine affecte directement la variation du rapport de rendement, que ce soit en l'élevant ou en l'abaissant, car cette différence affecte le travail de la turbine en l'abaissant ou en l'élevant par rapport à la quantité de chaleur obtenue de la chaudière.

En fin de compte, nous pouvons dire que l'une des conditions de base pour le travail des turbines à vapeur est la disponibilité de la chaleur et de la pression appropriées pour la vapeur, pour éviter des effets négatifs sur les turbines et leurs ailettes ou sur une autre partie de la machine à obtenir la plus grande efficacité possible.

*Références*

*Bibliographique*

## Références Bibliographique

### Chapitre I

[1] : <https://fr.wikipedia.org>.

[2] : [https://fr.vikidia.org/wiki/Machine\\_%C3%A0\\_vapeur](https://fr.vikidia.org/wiki/Machine_%C3%A0_vapeur)

[3] : <https://amp.fr.what-this.com/8648449/1/locomotive-sans-foyer.html>

[4] : <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/stirling.html>

[5]: <https://ressources.univlemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/thermo/stirling.html>

[6] : Abdou Touré. Étude théorique et expérimentale d'un moteur Ericsson à cycle de Joule pour conversion thermodynamique de l'énergie solaire ou pour micro-cogénération. Energie électrique. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2010. Français.

[7] : <https://energieplus-lesite.be/techniques/cogeneration9/turbine/>

[8] : <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Turbine%20%C3%A0%20gaz/fr-fr/>

[9] : <https://www.techno-science.net/definition/258.html>

[10] Mme. KLAI SIHEM, " CONSTRUCTION ... TURBINE A VAPEUR ", mémoire Magister, FACULTE SCIENCE DE L'INGENIEUR, SKIKDA. Année Universitaire 2008/2009

[11] : A.Taieb et Y.Ben Salem, " COURS MACHINES THERMIQUES ", Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Kélibia, Année universitaire 2014/2015.

[12] : TURBINES A VAPEUR & A GAZ Animé par : M. SILINI INSTITUT ALGERIEN DU PETROLE, Année2018.

[13] : Abdeljalil BÉRIBÉCHE, Calcul optimal des soutirages dans une turbine à vapeur d'un cycle hybride (Hassi R'Mel), Mémoire master, Université Mohamed Khider Biskra, Faculté des Sciences et de la Technologie, (Juin 2013).

[14] : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/turbines-a-vapeur/1-principe-de-fonctionnement-et-classification/>

[15]: How does a Thermal Power Plant Work? learn engineering,

<http://www.learnengineering.org/2013/01/thermal-power-plant-working.html>

## *Références Bibliographique*

---

- [16]: Working of Steam Turbine, learn engineering,  
<http://www.learnengineering.org/2013/02/working-of-steam-turbine.html>
- [17] : L. VIVIER, Turbine à vapeur et à gaz, Edition Albin Michel, (1965).
- [18] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale\\_%C3%A9lectrique\\_thermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_%C3%A9lectrique_thermique)
- [.1] : <https://www.pinterest.fr/pin/137289488619892885/>
- [.2] : <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/locomotive/66413>
- [.4] : <http://tpe-stirling-1s2.e-monsite.com/pages/principes-du-moteur/1-le-cycle-de-stirling.html>
- [.5] : Abdou Touré. Étude théorique et expérimentale d'un moteur Ericsson à cycle de Joule pour conversion thermodynamique de l'énergie solaire ou pour micro-cogénération. Energie électrique. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2010. Français.
- [.6] : [https://manuelnumeriquemax.belin.education/enseignement\\_scientifique-terminale/topics/es-tle-c06-132-a\\_la-conversion-de-l-energie-mecanique-en-electricite](https://manuelnumeriquemax.belin.education/enseignement_scientifique-terminale/topics/es-tle-c06-132-a_la-conversion-de-l-energie-mecanique-en-electricite)
- [.7] : MEMOIRE DE FIN D'ETUDES MASTER ACADEMIQUE, ETUDE DES CYCLES DE PUISSANCE A DEUX PHASES, Présenté par : ⚡ SEREIR Boumediene ⚡ MERSALI Mohammed Soutenu le 25/ 09/ 2019, Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem
- [.8] : UNIVERSITE SEDDIK BENYAHIA DE JIJEL, MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER EN GENIE MECANIQUE, thème : ANALYSE 4E (ENERGIE-EXERGIE-ECONOMIQUE ENVIRONNEMENTALE) D'UNE CENTRALE A TURBINE A GAZ, PRESENTE PAR : BOUCHEBOUT Saïd, DEFFAS Chemseddine en année 2018/2019.
- [.9] : <https://energieplus-lesite.be/techniques/cogeneration9/turbine/>
- [.10] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/>
- [.11] : [https://www.mpoweruk.com/steam\\_turbines.html](https://www.mpoweruk.com/steam_turbines.html)
- [.12] : En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Electrotechnique, Option : Systèmes Electro-Energétiques, Présenté par : CHENNA Amina, THEME : étude de commande d'un central de cogénération basé sur une turbine à vapeur. Année universitaire 2010.

## ***Références Bibliographique***

---

[.13] : <https://www.maxicours.com/se/cours/pompes-hydrauliques-non-volumetriques-introduction/>

[.14] : Mémoire de Master, Réalisé par : AZZOUG MOHAMED ABDEL HAKIM Thème Modélisation d'une chaudière à l'aide d'un outil graphique. Soutenu le 24/06/2014

[.15] : [https://www.researchgate.net/figure/Principe-dun-changeur-de-chaleur-tubes-calandre-11\\_fig7\\_274710463](https://www.researchgate.net/figure/Principe-dun-changeur-de-chaleur-tubes-calandre-11_fig7_274710463)

[.16] : <https://free3d.com/fr/3d-model/steam-turbine-rotor-4789.html>

[.17] : Ecole nationale supérieur des mines saint Etienne, Machines thermiques, Eléments de cours Année 2014-2015

[.19] : <https://www.pumpsandsystems.com/what-difference-between-centrifugal-rotodynamic-pumps>

[.20] : Projet De Fin De Cycle, La Turbine à Vapeur, Présenté par : Lahreche Rida, Kedda. Med. Bachir. Université Kasdi Merbah – Ouargla, 3ème Année Licence Énergétique 2017/2018.

### **Chapitre II**

[a] : UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA, Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département de Génie Mécanique, THESE Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Master 02 Option : Mécanique des Matériaux Etude comparative par simulation de deux aubes de turbine à vapeur, Par :SAMI BOUTERRA, année universitaire 2016/2017.

[b] : Université Abderrahmane Mira-Bejaia Faculté de la Technologie Département d'Electrotechnique En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Electrotechnique

Option : Systèmes Electro-Energétiques, sous le thème d'étude et commande d'une centrale de cogénération basée sur une turbine à vapeur, Présenté par : CHENNA Amina. Année universitaire 2010.

[c] : UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER INTITULE Etude exergetique d'une centrale thermique à vapeur DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE FILIERE : MASTER SPECIALITE : ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENT PRESENTE PAR : CHELBI MONCEF ELISLEM Année : 2016/2017

## *Références Bibliographique*

---

- [1] : Cours de thermodynamique 2eme semestre Olivia Penot 2010-2011 département génie thermique et énergie.
- [2] : Olivier PERROT, " COURS DE THERMODYNAMIQUE ", I.U.T. de Saint-Omer Dunkerque, Département Génie Thermique et énergie
- [3] : A.Taieb et Y.Ben Salem, " COURS MACHINES THERMIQUES ", Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Kélibia, Année universitaire 2014/2015.
- [4] : R. Kling, 'Thermodynamique Générale et Applications', Editons Technip, Paris 1980.
- [5] : [https://www.gunt.de/images/download/steam\\_power\\_plants\\_french.pdf](https://www.gunt.de/images/download/steam_power_plants_french.pdf)
- [6] : Daghboudj S, Gahmousse A, Harkati « L'Etude des fréquences propres d'une poutre encastree-libre cas d'une section constante (application aux aubes des turbines à vapeur et validation des résultats avec ABAQUS) », Communication Université Labri Tébessi, Tébessa, en 08-09/12/2009.
- [7] : Lucien vivier, Turbines à vapeur et à gaz : théorie, construction, utilisation ", Edition Albin Michel, 1965, p 446.
- [8] : TURBINES A VAPEUR & A GAZ Animé par : M. SILINI INSTITUT ALGERIEN DU PETROLE, Année2018.
- [9] : <http://www.climamaison.com/lexique/chaudiere.html>
- [10] : Stage pratique au niveau de la société ENCC (chaudrale), mémoire fin d'étude « Performance du cycle eau-vapeur des chaudières industrielles » MAHRAZ MOHAMED, ABBAS OUSSAMA, année universitaire 2017/2018.
- [11] : <https://diren.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/chaudieres.html>
- [12] : Formation Efficacité énergétique dans l'industrie du 21 au 25 Février 2017
- [13] : William LÉVY : Ingénieur de l'École Centrale de Lyon - Directeur du Département Contrats de la société Delas, 10 mai 1990.
- [14] : [https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/condenseur.php4#:~:text=Echangeur%20thermique%20au%20sein%20duquel,le%20vide%20dans%20certaines%20installations](https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/condenseur.php4#:~:text=Echangeur%20thermique%20au%20sein%20duquel,le%20vide%20dans%20certaines%20installations)
- [15] : Condenseur (séparation)". Dans Wikipédia, l'encyclopédie libre. [En ligne]. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Condenseur\\_\(séparation\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Condenseur_(séparation)).

## *Références Bibliographique*

---

[15(a)] : UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER, Dimensionnement du condenseur de la centrale thermique de Hadjret Ennousse, PRESENTE PAR : BOUCHAMA Mohamed Saïd Année : 2017/2018

[16] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pompe#Caract%C3%A9ristiques>

[17] : <http://fr.croospump.com/power-generation.html>

[18] : <https://www.climamaison.com/lexique/vapeur-d-eau.html>

[19] : Lycée pilote innovant international, Christophe Alleau La vapeur d'eau.

[20] : <https://www.tlv.com/global/FR/steam-theory/types-of-steam.html>

[21] : <http://www.sciences.ch/htmlfr/mecanique/mecanthermodyn01.php>

[22] : Université de Skikda 11 aout1955, Mémoire pour l'obtention du diplôme magister (école doctorale stic), présenté par Mme Klai Sihem, faculté : science de l'ingénieur, département : informatique sur le thème De : Construction d'une ontologie à partir de bases de données pour l'aide à la maintenance industrielle application : turbine à vapeur, Année universitaire 2008/2009.

[.1] : Université Badji Mokhtar Annaba, présente en vue de l'obtention du diplôme de master, dimensionnement du condenseur de la centrale thermique de hadjret ennousse, présente par : Bouchama Mohamed Saïd en année : 2017/2018

[.2] : Université kasdi merbah – Ouargla, 3ème année licence énergétique, la turbine à vapeur, présenté par : lahreche Rida Et Kedda Med Bachir en année 2017/2018.

[.5]: Thermodynamics: an engineering approach, 6th edition yunus a. cengel, Michael a. boles mcgraw-hill, 2008, chapter 10 vapor and combined power cycles.

[.7] : Mémoire de master, en génie mécanique, option : mécatronique étude et améliorations du rendement de la centrale électrique de Jijel par : Mr. Benslimane houssemmeddine, université Badji Mokhtar Annaba en année 2016-2017.

[.9] : Mémoire de fin d'études ; en vue de l'obtention du diplôme de master en génie mécanique option : énergétique, thème influence des paramètres du système de détente sur le fonctionnement de la centrale thermique de cap-djinet, présenté par Mr : Tellache Nordine, En année 2011/2012.

## *Références Bibliographique*

---

[.10] : Université Badji Mokhtar Annaba faculté des sciences de l'ingénierat département de génie mécanique, mémoire présente en vue de l'obtention du diplôme de master, Intitule étude exergétique d'une centrale thermique à vapeur domaine : sciences et technologie,

Filière : master spécialité : énergétique et environnement présente par : Chelbi Moncef El islem  
En année : 2016/2017.

[.11] : TURBINES A VAPEUR & A GAZ Animé par : M. SILINI INSTITUT ALGERIEN  
DU PETROLE, Année2018.

[.16] : Mémoire fin de cycle licence, université Ain Temouchent fait par Ghorzi abdelouaheb, et Berehail Abdelali en année 2018/2019.

[.20] : [https://www.azprocede.fr/cours\\_gc/combustion\\_chaudiere.html](https://www.azprocede.fr/cours_gc/combustion_chaudiere.html).

[.21] : Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme de master, domaine : sciences et technologie, filière : génie mécanique, spécialité énergétique sur le thème de : performance du cycle eau-vapeur des chaudières industrielles, présenté par : Mahraz Mohamed et Abbas Oussama en année 2017/2018.

[.24] : formation efficacité énergétique dans l'industrie du 21 au 25 février 2017.

[.30] : <https://seibo.fr/produits-services/maintenance-electromecanique/reparation-et-maintenance-pompe/>.

[.31] : <https://www.tlv.com/global/FR/steam-theory/types-of-steam.html>.

[.34] : Université de Skikda 11 aout1955, Mémoire pour l'obtention du diplôme magister (école doctorale stic), présenté par Mme Klai Sihem, faculté : science de l'ingénieur, département : informatique sur le thème De : Construction d'une ontologie à partir de bases de données pour l'aide à la maintenance industrielle application : turbine à vapeur, Année universitaire 2008/2009.

### *Chapitre III*

[1] : PROJET DE FIN D'ETUDES Pour l'obtention du diplôme de Master sur le thème de Etude d'une Centrale Thermique (Bilan thermodynamique de la centrale de TERGA) Présenté Par : ELHACOUMO Yamani et ELGHARBI Khadîdja a centre Universitaire d'Ain Témouchent, année universitaire 2013/2014.

[2] : Alstom document Centrale Cycle Combiné de TERGA.

[3] : [https://coursexamens.org/images/An\\_2013/Etudes\\_superieures/Ingeniorat\\_mecanique/3\\_annee/Thermo\\_energ/exer\\_supl\\_sol/Meca1855\\_Sol\\_10\\_2012.pdf](https://coursexamens.org/images/An_2013/Etudes_superieures/Ingeniorat_mecanique/3_annee/Thermo_energ/exer_supl_sol/Meca1855_Sol_10_2012.pdf)

[4] : INSTITUT FRANÇAIS DU FROIDE INDUSTRIEL, aspects thermodynamique et technico-économique des systèmes a absorption liquide, Jean Castaing lasvignottes.

[5]: Technical engineering note fast calculations, institute of thermomechanics, academy of sciences of Czech republic J.Patek , O.Sifner, 1994.

[.1] : Université d'Ain Témouchent, Institut des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Mécanique, Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master, Filière : Génie Mécanique, Spécialité : Energétique, Thème : Analyse du Fonctionnement D'une Turbine à Gaz et d'une Turbine à Vapeur Dans une Centrale à Cycle Combiné (SKT). Présenté en : 2015 par : Melle BEKHALED Fatima Zahra., Melle ACHOUR Bouchra.

[.2] : Alstom document Centrale Cycle Combiné de TERGA.

[.3] : [https://coursexamens.org/images/An\\_2013/Etudes\\_superieures/Ingeniorat\\_mecanique/3\\_annee/Thermo\\_energ/exer\\_supl\\_sol/Meca1855\\_Sol\\_10\\_2012.pdf](https://coursexamens.org/images/An_2013/Etudes_superieures/Ingeniorat_mecanique/3_annee/Thermo_energ/exer_supl_sol/Meca1855_Sol_10_2012.pdf)

[.4]: Thermodynamics: an engineering approach, 6th edition yunus a. cengel, Michael a. boles mcgraw-hill, 2008, chapter 10 vapor and combined power cycles.