



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

**Projet de Fin d'Études  
Pour l'obtention du Diplôme de Master 2 en Génie  
Mécanique**

**Option : Énergétique**

**Titre :**

**Étude de la chaudière de récupération snc-lavalin**

Proposé et encadré par :  
M.GUERGADJ MOHAMED

Réalisé par :  
- MEDJBER MOUSSA  
- ERROUKRMA ABOUBAKR  
- BENMEDDAH YAHIA

Année universitaire 2019/2020

## Remerciements

---

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du Département de Mécanique de l'Université Saad Dahlab de Blida.

Selon la tradition, et à travers cette page de remerciements, nous tenons à saluer toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce travail.

Nous remercions Monsieur **Guergadj Mohamed** pour avoir accepté de diriger cette thèse, et dont l'aide précieuse nous été indispensable sur le plan scientifique et humain.

Nous voudrions remercier les membres du jury pour leur précieux temps accordé à la lecture et à la critique de ce travail.

Nos très cordiaux remerciements vont aussi à tous nos enseignants pour tous les efforts conjugués tout au long de notre formation.

## Table des Matières

Remerciements	
Liste des tableaux.....	1
Liste des figures.....	2
Nomenclature et abréviations.....	4
Résumé général.....	6
Introduction générale.....	8
Chapitre I : Présentation de la centrale thermique Hadjret Ennous	
I.1 Introduction .....	10
I.2 Présentation de l'entreprise .....	10
I.3 Missions et tâches de la centrale .....	12
I.4 Les composants principaux du cycle .....	13
I.5 Les auxiliaires de la centrale .....	21
Chapitre II : Description du cycle combiné de la centrale thermique	
II.1 Cycle thermique .....	24
II.2 Eléments du Cycle Combiné .....	25
II.3 Les Cycles thermodynamiques .....	26
II.4 Turbine à gaz .....	28
II.5 Turbine à Vapeur .....	31
II.6 Source Froide .....	32
II.7 Chaudière de Récupération .....	34
Chapitre III : Paramètres thermodynamique d'un cycle vapeur	
<b>III.1</b> La chaudière (HRSG) .....	37
<b>III.2</b> Bases de la thermodynamique à la vapeur .....	38
<b>III.3</b> Production de vapeur utilise .....	40
<b>III.4</b> HRSG: Notions de conception .....	42
<b>III.5</b> Dimensionnement .....	45
<b>III.6</b> Performances .....	47
<b>III.7</b> Cogénération .....	50
Chapitre IV : Etude d'une chaudière de récupération	
IV.1 Conception du HRSG .....	53
IV.2 La configuration de la chaudière dans la centrale de Hadjret Ennous .....	53

IV.3	Paramètre d'entrée .....	53
IV.4	Description du procédé .....	55
IV.5	Equilibre d'énergie .....	56
IV.6	Distribution de la température à l'intérieure de la chaudière de récupération .....	61
IV.7	Calcule de l'approche et de pincement .....	62
IV.8	Analyse de la chaudière avec combustion secondaire .....	66
Conclusion générale .....		71
Référence bibliographie .....		72

## Liste des tableaux

Tableau 3.1 : de la vapeur produite par chacun des chaudières de récupération.....	30
Tableau 3.2 : modèles de turbine à gaz.....	41
Tableau 4.1 : Données et exploitation techniques paramètres de turbine à gaz à 9.8 ° C.....	47
Tableau 4.2 : distribution de température sans post combustion.....	55
Tableau 4.3 : distribution température avec combustion auxiliaire.....	62

## Liste des figures

Figure 1.1 : de transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique .....	6
Figure1.2 : Schéma représentant la turbine à gaz .....	7
Figure1.3 : Schéma représentant le compresseur.....	7
Figure ( 1.4) : schéma représentant la combustion.....	7
Figure1.5 : Schéma représentant la turbine à vapeur.....	9
Figure1.6 : Schéma représentant la chaudière de récupération.....	11
Figure1.7 : Schéma représentant le condenseur.....	12
Figure1.8 : Principe de fonctions de l'alternateur.....	12
Figure1.9 : Schéma représentant l'alternateur .....	13
Figure1.10 : Les principaux équipements d'une centrale à cycle combiné .....	15
Figure 2.1 : Cycle Combiné .....	17
Figure 2.2 : Eléments du Cycle Combiné.....	18
Figure 2.3.1 : Cycle de Hirn .....	19
Figure 2.3.2 : Cycle à Resurchauffe .....	20
Figure 2.4 : Principe d'une turbine à gaz .....	21
Figure 2.5 : Schéma d'une turbine à gaz .....	22
Figure2.6 : Cycle idéal de Brayton .....	23
Figure 2.7 : Cycle réel de Brayton.....	23
Figure 2.8 : une turbine à action et à réaction.....	24
Figure 2.9 : Le condenseur en circuit ouvert.....	26
Figure3. 1et 2 : lire le diagramme de Mollier.....	32
Figure 3.3 : Description produire de la vapeur.....	33
Figure 3.4 : la température et pression de saturation à l'intérieur du tambour .....	34
Figure 3.5 : l'appareil qui produit de la vapeur .....	34
Figure 3.6 : chaudière à débit de gaz vertical.....	36
Figure 3.7 : chaudière à débit de gaz horizontal.....	37
Figure 3-8 : Niveaux de pression.....	38
Figure 4.1 : boucle basse pression.....	51
Figure 4.2 : boucle moyen pression.....	52
Figure 4.3 : circuit haute pression.....	53
Figure 4.4 : puissance transférée dans la boucle BP.....	57
Figure 4.5 : puissance transférée dans la boucle MP .....	58

Figure 4.6 : puissance transférée dans la boucle HP.....5

## Nomenclature et abréviations :

f : rapport des débits combustible/ air de combustion

h : enthalpie (kJ/kg)

HRSG :générateur de vapeur a récupération de chaleur ( Heat recovery steam generator )

$\dot{m}$ : Débit (kg/s)

PCI : pouvoir calorifique inférieur (kJ/kg)

Q : Energie échangée (kJ/kg)

P puissance (MW)

R : constante universelle des gaz parfaits (8.314 kJ/kmol K)

r : rapport des débits air de combustion /air de compression

SKH : SHARIKAT KAHRABAA Hadjret Ennouss (SKH)

DLN : Dry Low Nox

Nox : oxyde d'azote ou monoxyde d'azote

Co : monoxyde de carbone

T : température (K, °C)

TG : turbine à gaz

TV : turbine à vapeur

W : travail (kJ/kg)

X : titre du liquide saturé

### **Symbole grecs :**

$\eta$  : rendement

$\varepsilon$  : efficacité

$\lambda$  : coefficient stœchiométrique

$\tau$ : rapport de compression

$\mu$  : masse molaire (kg/kmole)

$\Delta$  : différence

### **Indices :**

b : basse pression

prech : préchauffage

recirc : recirculation

h : haute pression

isp : isentropique de la pompe

ist : isentropique de la turbine

m : moyenne pression  
mix : relative au point mix  
ambient : ambiante  
a : air  
CC : cycle combiné  
e : entrée  
g : relative au gaz  
ap: approche  
pp, pinc : pincement  
HP : haut pression  
MP : moyenne pression  
LP : basse pression  
c : relative au compresseur  
t : relative au turbine  
rej : rejet  
s : sortie  
sat : saturation  
1, 2, 3, 4 : points du cycle à gaz

## ملخص

الهدف الأول من دراستنا هو تحليل الدورة المركبة وخاصة تلك الخاصة بمحطة توليد الطاقة الحرارية في حجرت النص بهدف تقييم هذا الأداء.

لدينا وصف جيد لدورة البخار ومعاييرها لمعرفة دورها وفهم مبدأ تشغيلها.

لقد أعدنا وصفاً تفصيلياً جيداً لمرجل الاسترداد وقمنا بتحليل تطور أداء غلاية الاسترداد، وطبقنا معادلات توازن الطاقة على جميع عناصر المرجل.

و قسمنا عملنا إلى مراحل:

- الفصل الأول: عرض لمحطة توليد الطاقة الحرارية في حجر النوس
- الفصل الثاني: وصف الدورة المركبة لمحطة الطاقة الحرارية
- الفصل الثالث: البارامترات الديناميكية الحرارية لدورة البخار
- الفصل الرابع: تحجيم غلاية الاسترجاع
- خلاصة عامة

كلمات مفتاحيه للدورات المركبة. توربينات البخار. غلايات استرجاع

## Abstract

The first goal of our study is the combined cycle analysis and particularly that of the Hadjret Ennous thermal power plant with a view to evaluating these performances

We have a good description of the steam cycle and its parameters in order to know its role and understand the principle of its operation.

We have prepared a good detailed description of the recovery boiler and analyzed the evolution of the performance of the recovery boiler, and applied the power balance equations to all the elements of the boiler.

We have divided our work into stages:

- Chapter I: Presentation of the Hadjret Ennous thermal power plant
- Chapter II: Description of the combined cycle of the thermal power plant
- Chapter III: Thermodynamic parameters of a steam cycle
- Chapter IV: sizing of a recovery boiler
- General conclusion

**Keywords:** HRSG, steam turbine, combined cycle.

## Résumé

Le premier but de notre étude est l'analyse de cycle combiné et particulièrement celui de la centrale thermique de Hadjret Ennous en vue d'une évaluation de ces performances

Nous avons une bonne description du cycle vapeur et de ses paramètres afin de connaître son rôle et comprendre le principe de son fonctionnement.

Nous avons préparé une bonne description détaillée de la chaudière de récupération et analysé l'évolution des performances de la chaudière de récupération, et appliqué les équations de bilan de puissance à tous les éléments de la chaudière.

Nous avons divisé notre travail en étapes:

- Chapitre I: Présentation de la centrale thermique Hadjret Ennous
- Chapitre II: Description du cycle combiné de la centrale thermique
- Chapitre III: Paramètres thermodynamique d'un cycle vapeur
- Chapitre IV: dimensionnement d'une chaudière de récupération
- Conclusion générale

**Mots clé** : chaudière de récupération, cycle combine, turbine à vapeur

## Introduction générale

---

L'Algérie produit environ 6 600 mégawatts d'électricité, dont 95% proviennent de centrales thermiques et le reste de centrales hydroélectriques. La consommation annuelle d'énergie électrique est d'environ 6%.

Après mon stage durant le mois de janvier 2020 à la centrale thermique d'Hadjret Ennous, le sujet de mon projet de fin d'études en Master Energétique a été décidé. Se concentre sur l'amélioration des performances principales de chaudière de l'usine visitée. A cet égard, on se demande si l'étude répondait aux critères? De plus, que faut-il faire pour avoir un impact positif sur la production d'énergie de cette centrale thermique?

Notre objectif étudier la force du cycle combiné ou niveau de chaudière de récupération et la formation d'échangeurs de chaleur entre les gaz et la vapeur à l'intérieur de la chaudière.

Afin de mener à bien ce travail et de vérifier les hypothèses établies, nous les avons étudiées à travers ce résumé de quatre chapitres:

- Chapitre I: Présentation de la centrale thermique Hadjret Ennous
- Chapitre II: Description du cycle combiné de la centrale thermique
- Chapitre III: Paramètres thermodynamique d'un cycle vapeur
- Chapitre IV: Etude d'une chaudière de récupération

Le mémoire s'achève par une conclusion générale dans laquelle le travail réalisé est synthétisé

# *Chapitre 1 ;*

**Présentation de la centrale thermique**

**Hadjret Ennous**

## **I.1 Introduction**

Ce chapitre constitue le rapport de stage effectué au sein de la centrale thermique. Il englobe la présentation et l'historique de l'entreprise principal actionnaire du site industriel.

## **I.2Présentation de l'entreprise :**

### **I.2.1.Le groupe SNC-Lavalin :**

Le groupe est présent dans une centaine de pays, son siège social est à Montréal au Canada. Il se classe parmi les 10 plus grosses firmes du genre par le nombre d'employés au monde.

Lavalin est issu de la fusion de SNC et de la Lavalin en 1991. Le groupe SNC-Lavalin est l'un des plus importants groupe d'ingénierie et de construction au monde. C'est un acteur majeur en matière de propriété d'infrastructures et de services d'exploitation et d'entretien. SNC-Lavalin possède des bureaux dans tout le Canada et dans plus de 35 autres pays. [1]



### **I.2.2. Activités :**

SNC-Lavalin fournit la main-d'œuvre pour concevoir et gérer différents ouvrages demandant une expertise en génie civil ou en énergie.

Elle fournit des services d'ingénierie, d'approvisionnement, de construction, de gestion de projet et de financement de projet dans différents secteurs d'activité économiques.

En 2008, elle est décrite comme la plus grande société d'ingénierie au monde. Elle compte à ce moment 4500 employés au Québec et de 16000 dans le monde, dont 1052 ingénieurs québécois.

### **I.2.3.Historique :**

La création de groupe SNC-Lavalin Inc remonte à 1911, lors qu'Arthur Surveyer fonde un petit cabinet d'ingénierie-conseils. Au fil des ans, la firme connaît une croissance constante et se taille une réputation d'excellence au Canada dans les secteurs du génie civil et de l'énergie. En 1937, le fondateur s'associe à Emil Nenniger et à Georges Chevert. En 1947 l'entreprise est rebaptisé Surveyer, Nenniger et Chenevert Inc.

#### **I.2.3.1 Emplacement :**

La centrale à cycle combiné de Hadjret est située dans la wilaya de Tipaza, à environ 12 Km à l'ouest de Cherchell. Elle est limitée au sud par la route nationale RN 11 et au nord par la mer Méditerranée. Son site possède une superficie d'environ 35 hectares.

La centrale est constituée de plusieurs bâtiments dont trois principaux, couvrant chacun une superficie d'environ 2150 m<sup>2</sup>. Chaque bâtiment abrite principalement:

- une turbine à gaz et une turbine à vapeur,
- il est muni de ponts roulants et de monorails servant à l'entretien du groupe turbo-alternateur.
- une chaudière de récupération (HRSG)
- des systèmes de refroidissement situés à l'extérieur.

Les autres bâtiments de la centrale abritèrent la cantine, les unités pour le traitement d'eau, le poste de départ, la salle de contrôle. Les équipements d'entretien et les entrepôts.

Le poste de départ est situé au sud des trois îlots de production d'énergie.

La centrale est munie d'une prise d'eau de mer et d'une station de pompage. L'eau pompée servira principalement à refroidir la vapeur du condenseur, ainsi que les auxiliaires de la centrale. Les eaux refroidissement seront rejetées dans la mer Méditerranée par trois émissaires.

#### **I.2.3.2.Composantes de la centrale :**

La centrale est d'une puissance nette d'environ 1200 MW, elle est prévue pour être exploitée toute l'année en charge de base pour répondre à la demande d'énergie vers un réseau général interconnecté, sur une base annuelle, la centrale générera au maximum environ 10 TWh, ce qui correspond à une disponibilité de 94% ou à 8234 heures de fonctionnement par année.

Cette centrale électrique comporte de nombreux équipements mais un seul produit de l'électricité et c'est l'alternateur. Pour assurer sa production, l'alternateur doit être mis en rotation par une turbine qui tourne elle-même grâce à la force de l'eau. L'électricité générée par l'alternateur sera élevée à de haute tension par un transformateur pour être ensuite envoyée sur les lignes de transport.

### **1.3 Missions et tâches de la centrale :**

#### **1.3.1 Description générale du cycle combiné :**

Une centrale produit de l'électricité grâce à la chaleur produite dégagée de la combustion de gaz naturel.

Ce type de centrale combine de type de turbine : une turbine à gaz et une turbine à vapeur relié à un alternateur. Ce mécanisme permet d'accroître la production et augmenter le rendement.

C'est alors la combinaison de 2 processus thermodynamiques:

- Le premier consiste à produire de l'électricité à partir d'un moteur thermique (turbine à gaz).
- le second, à récupérer l'énergie thermique contenue dans les gaz d'échappement pour produire de la vapeur d'eau par l'intermédiaire d'une chaudière de récupération de chaleur et d'utiliser cette énergie dans une turbine de vapeur.

#### **1.3.2. Principe de fonctionnement du cycle :**

Dans la turbine à gaz (combustion), de l'air est injecter dans un compresseur à haute pression .L'air ainsi comprimé est ensuite propulsé dans la chambre de combustion ou il se mélange au combustible .le mélange air-gaz s'enflamme et produit des gaz d'échappement qui active la rotation de la turbine combustion qui fait tournée l'alternateur.

La chaleur des gaz qui sorte de la turbine de combustion est ensuite récupérée dans une chaudière tapissée de tube où circule de l'eau et ensuite dirigé vers un ballon dans lequel elle se transforme en vapeur.

Cette vapeur est alors renvoyée vers la turbine à vapeur et fait tourner ces roues.

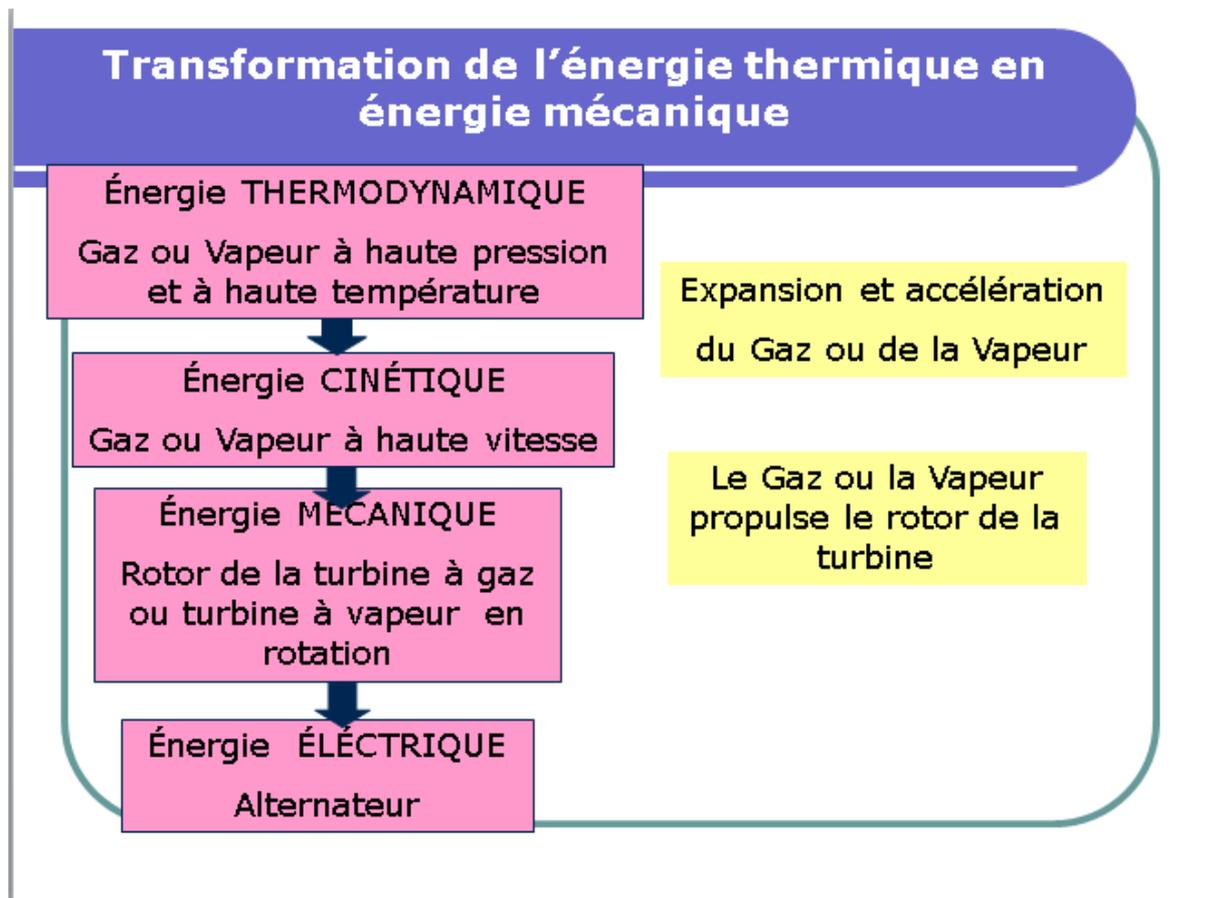
L'énergie transmise par la rotation de la turbine vapeur est transmise à l'alternateur et s'ajoute à l'énergie déjà transmise par la turbine à gaz ce qui fait deux sources d'énergie mécanique.

L'alternateur produit ainsi de l'électricité.

A l'aide d'un transformateur on augmente la tension du courant généré pour qu'il puisse être transporté facilement dans les lignes à hautes tension du réseau.

La vapeur qui est sortie de la turbine passe enfin dans un condenseur dans lequel circule de l'eau froide (eau de mer) elle est ainsi retransformée en eau et renvoyé dans la chaudière.

Les fumées issue de la combustion sont filtré avant d'être évacué par les cheminé mais grâce à l'usage du gaz naturel qui est un très bon combustible l'émission du co2 est réduite.



**Figure1.1** : cycle de transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique

#### **I.4 Les composants principaux du cycle :**

##### **I.4.1 La turbine à gaz (combustion) :**

###### **a) Les Caractéristiques :**

- Fabricant: General Electric
- Modèle: 9FB
- Puissance: 268,8 MW
- Poids: 288 Tm
- Combustible: Gaz Naturel ou/et gazole
- Température de Gaz à l'entrée: 185 °C
- Pression de Gaz à l'entrée: 28 bars
- Nombre de brûleurs: 18
- Nombre d'étages de turbine: 4
- Température d'échappement: 623 °C
- Consommation de gaz à pleine charge: 18,3 kg/s

# Turbine à gaz

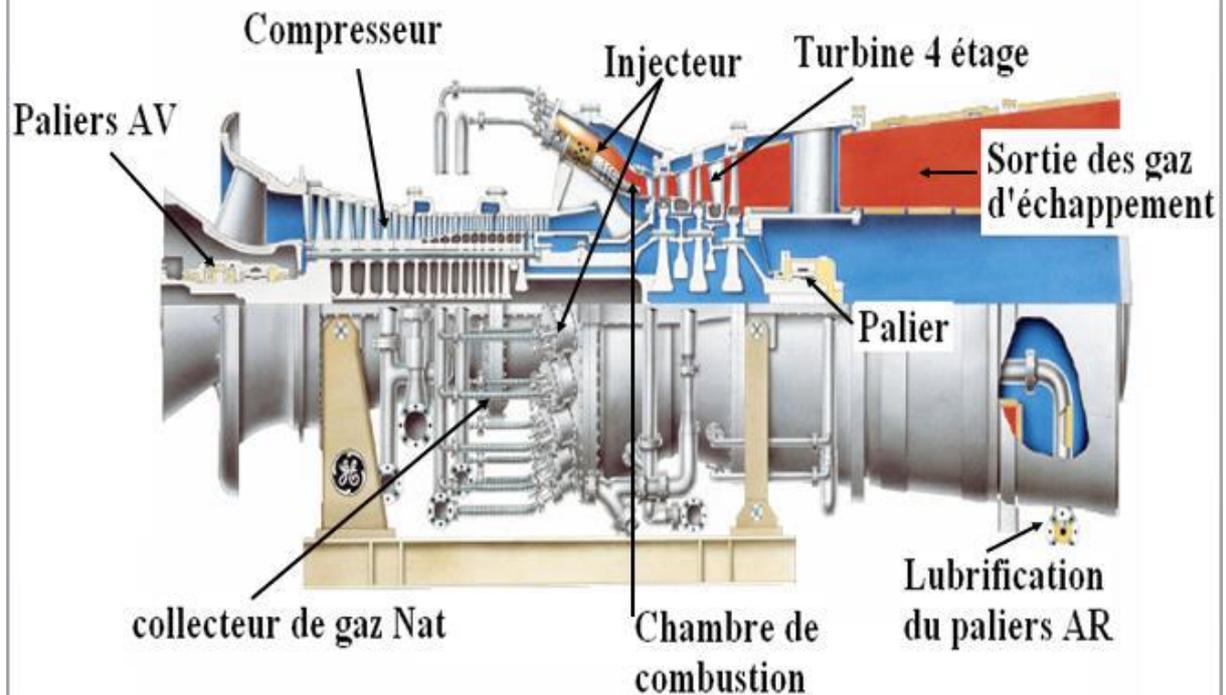


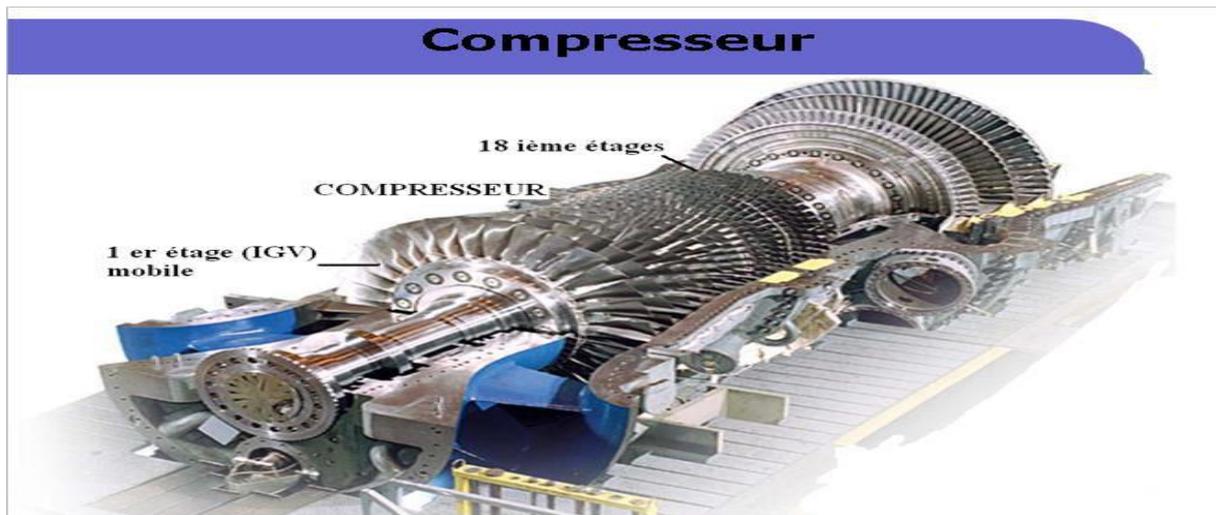
Figure1.2 : Schéma représentant la turbine à gaz

## b) Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement de la turbine à gaz passe par trois étapes principales qui sont l'admission + compression d'air, la combustion et la détente + échappement.

- **La compression :**

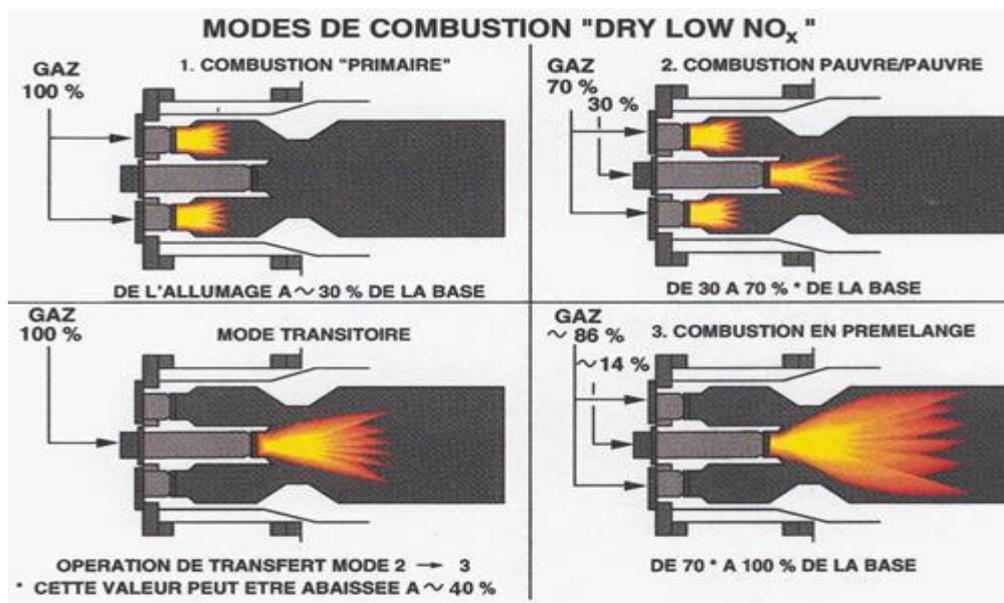
Là intervient la partie compresseur qui augmente la pression de l'air d'un taux de 18.3 au débit de 600 kg/s et ainsi alimente la chambre de combustion avec l'air comprimé avant l'injection du gaz.



**Figure1.3 :** Schéma représentant le compresseur

- **La combustion :**

La combustion se passe dans la chambre de combustion où le mélange combustible (air comprimé + le gaz) s'enflamme générant une température très élevée pouvant atteindre 1393 C° et poussant ainsi les gaz résiduels vers les roues de la turbine.



**Figure ( 1.4) :** schéma représentant la combustion

- **La détente et l'échappement :**

Les gaz issue de la combustion vont faire tourner les roues de la turbine et créant ainsi de l'énergie mécanique qui est transmise vers l'alternateur ensuite les gaz résiduels de hautes température (600 C°) seront acheminé vers la chaudière de récupération où ils vont servir à chauffer l'eau et le transformer en vapeur puis ils seront filtré avant d'être évacuer à l'extérieur .

## I.4.2 La turbine à vapeur :

### a) Description :

La Turbine à Vapeur a comme mission la transformation de l'énergie thermique de la vapeur en énergie mécanique de rotation.

La Turbine à Vapeur dispose de couronnes de lames fixes et mobiles et il existe trois niveaux de pression : Haute Pression(HP), Moyenne Pression(MP) et Basse Pression(BP).

Le rendement approximatif de chaque section de la Turbine de Vapeur est :

HP 78 à 84 %

MP 87 à 92 %

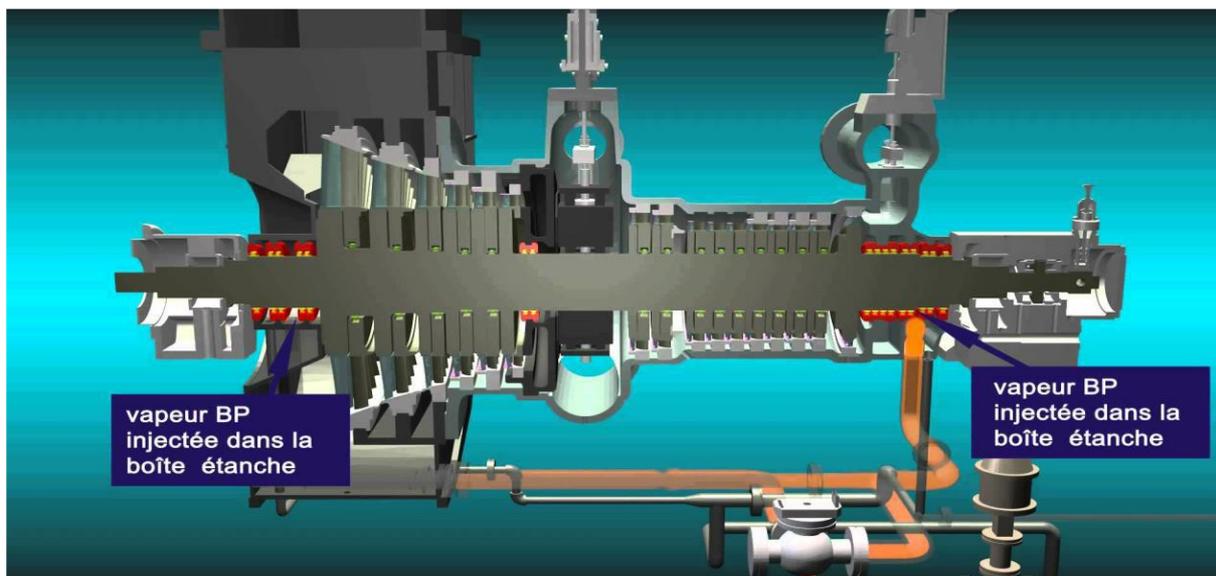
BP 86 à 90 %

Le pourcentage de puissance produite dans chaque section de la Turbine est :

HP 25 à 30 %

MP 15 à 22 %

BP 50 à 60 %



**Figure1.5 :** Schéma représentant la turbine à vapeur

### b) Les caractéristiques :

- Turbine de Haute Pression:

Pression d'entrée : 147 bars

Température d'entrée. 565,5 °C

Débit de Vapeur d'entrée : 78,83 kg/s

- Turbine Moyenne pression:

Pression d'entrée : 21.65 bar

Température d'entrée. 565,5 °C

Débit de Vapeur d'entrée : 86,69 kg/s

- Turbine basse Pression:

Pression d'entrée : 3.654 bars

Température d'entrée. 312,8 °C

Débit de Vapeur d'entrée : 100,33 kg/s

Pression de sortie : 0.03691 bar (pression condenseur)

Température de sortie : 27,6 °C

### **Principe de fonctionnement :**

Chaque palier de la turbine à vapeur va recevoir de la vapeur de pression différente depuis la chaudière de récupération et cela va entraîner la rotation des roues de cette turbine et générer ainsi de l'énergie mécanique qui est transmise à l'alternateur .Ensuite la vapeur résiduelle va être acheminé vers le condenseur où elle va changer de l'état gazeux à l'état liquide et elle sera après envoyée à la chaudière marquant ainsi le début d'un nouveau cycle.

### **I.4.3 La chaudière de récupération :**

#### **a) Description générale :**

La chaudière a pour but de transformer l'eau liquide en vapeur sèche pour qu'il soit prêt à être utilisé par la turbine à vapeur et pour cela elle utilise la chaleur produite par l'évacuation des gaz brûlés par la turbine à gaz.

Alors l'eau liquide passe par trois étapes suivant la température du milieu.

#### **b) Les différents composants de la chaudière :**

- **L'économiseur :**

C'est la premier étape où l'eau liquide est pompé à température environ 30C° .alors le but de l'économiseur c'est d'élever cette température pour arriver à la limite de l'évaporation (environ 90C°)

Et pour cela le tube d'eau passe par un milieu chauffé à 100C° et ensuite l'eau est stockée dans un ballon.

- **L'évaporateur :**

Le rôle de l'évaporateur c'est de faire passer l'eau chauffé à l'état gazeux à travers un circuit de circulation naturelle et passe par un milieu à température d'environ 200C° se transformant ainsi en vapeur saturé (humide).

- **Le surchauffeur :**

Il reçoit la vapeur saturée issue de l'évaporateur est la chauffe à très haute température (environ 600°C) pour produire de la vapeur sèche prête à être acheminée vers la turbine à vapeur.

**c) Remarque :**

Dans le cas de la centrale de Hadjret Ennos la turbine à vapeur comporte trois sections (HP, MP, BP) alors la chaudière de récupération comporte trois niveaux de pression ce qui fait trois économiseurs, trois évaporateurs et trois surchauffeurs et cela pour limiter au maximum les pertes en chaleur.

**d) Propriété de la vapeur à la sortie de chaque section :**

- **Basse Pression:** 4.085 bars

**Température :** 296,9 °C

**Débit :** 10,77 kg/s

- **Pression intermédiaire:** 22.09 bar

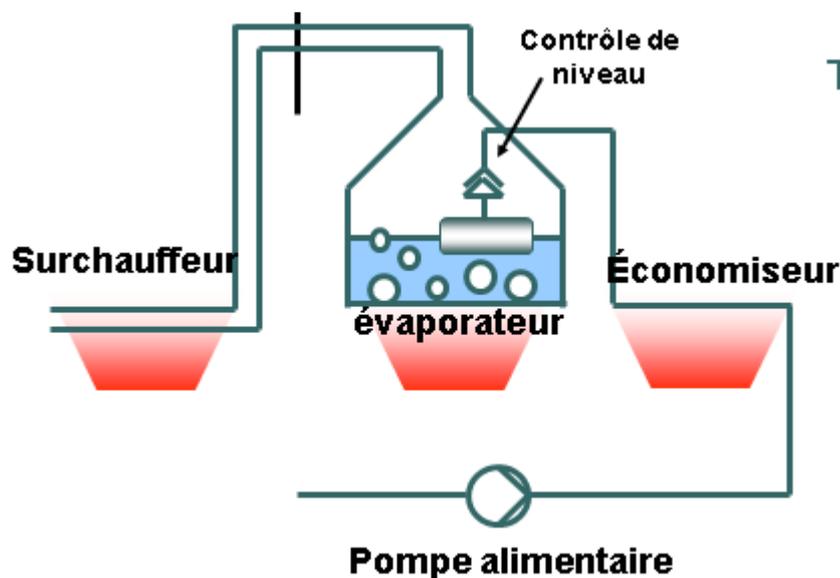
**Température :** 566,2 °C

**Débit :** 86,69 kg/s

- **Haute Pression:** 98.57 bar

**Température:** 566,5 °C

**Débit:** 78,83 kg/s



**Figure1.6 :** Schéma représentant la chaudière de récupération

**Le condenseur :**

**a) Les caractéristiques du condenseur :**

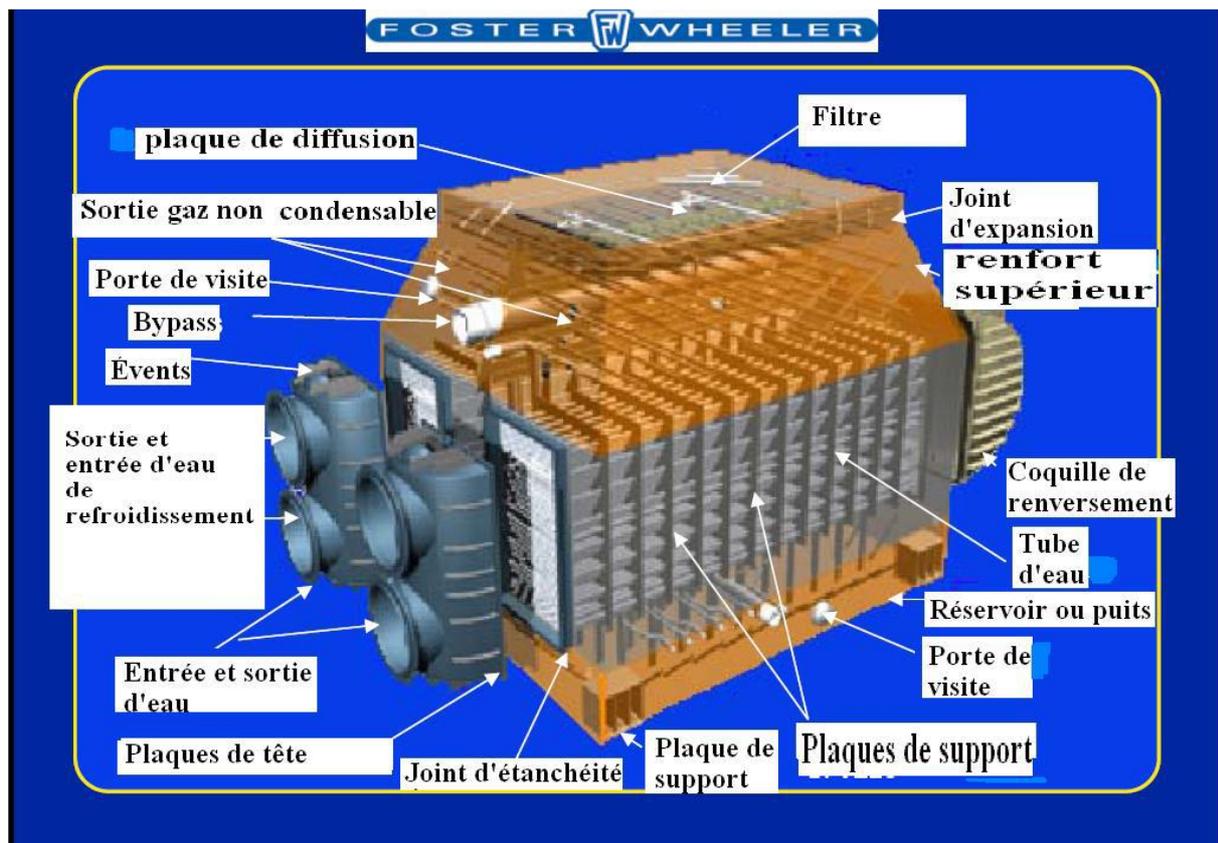
Fabricant : FOSTER WHEELER

Modèle : Rectangulaire

Entrée de Vapeur: verticale  
 Nombre de Passe : 2  
 Nombre de Tubes : 11.826  
 Diamètre des Tubes : 25.4 mm  
 Longueur des Tubes : 10,028 m  
 Matériel des Tubes : Titane  
 Débit d'Eau de Circulation: 20.387 m<sup>3</sup>/h  
 Débit de Vapeur : 362,61 Tm/h  
 Pression de Travail : 0.030701 bars abs

**b) Le fonctionnement du condenseur :**

Le condenseur va recevoir la vapeur résiduelle issue de la turbine à vapeur et il va la mettre en contact thermique avec une source froide (l'eau de mer). Alors la vapeur va se transformer en eau liquide qui va être pompé vers la chaudière de récupération.



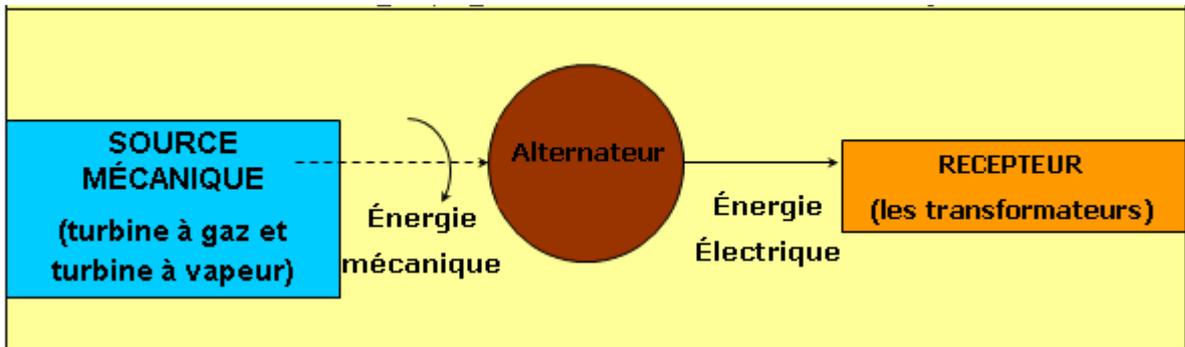
**Figure1.7 :** Schéma représentant le condenseur

**I.4.4 L'alternateur :**

**a) Description générale :**

C'est celui qui reçoit l'énergie mécanique fournie à partir de la turbine à gaz et la turbine à vapeur et la transforme en énergie électrique.

Il comporte deux éléments essentiels qui sont : la partie mobile (rotor) et la partie fixe (stator).  
L'alternateur utilise un système de refroidissement à base d'hydrogène qui circule en boucle fermée.



**Figure1.8** : Principe de fonctionnement de l'alternateur

**Caractéristiques de l'alternateur :**

- Fabricant : Général Electric
- Taux : Triphasé, refroidi par H<sub>2</sub> (Hydrogène)
- Pression : 5,17 bar (75 psi), 40°C
- Puissance apparente : 544 Mva
- Tension de Génération : 19 kV
- Vitesse de rotation : 3.000 rpm
- 3 phases, 50 Hz

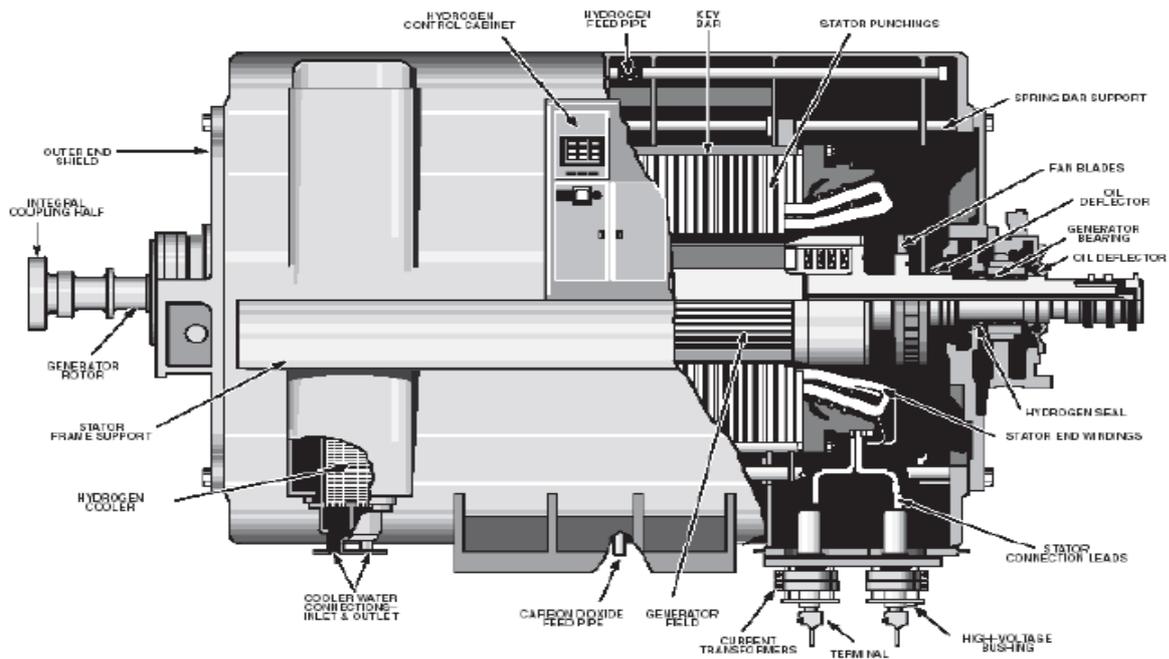
**c) Les composants de l'alternateur :**

- Stator : noyau et fuseaux.
- Rotor : Corps, fuseaux et anneaux de retenue.
- Sorties de phase
- Réfrigération
- Coussinets
- Joints d'étanchéité d'huile
- Équipement d'Excitation
- Synchronisation

**d) Le principe de fonctionnement :**

Le rotor qui est un aimant tourne dans le stator générant ainsi un champ magnétique.

Le stator qui contient une bobine fixe à son tour répond à la variation du champ magnétique en créant un F.E.M et ainsi produit de l'électricité



**Figure 1.9 :** Schéma représentant l'alternateur

**e) Le transformateur principal :**

Après l'étape de la génération du courant par l'alternateur, on doit abaisser l'intensité du de ce courant pour faciliter son transport dans les lignes a hautes tension du réseau, et pour cela on utilise un transformateur élévateur de tension.

Ce dernier vas augmenter la tension du courant de 18.5KV jusqu'à 400KV sois diminuer l'intensité jusqu'à 500 A.

**I.5 Les auxiliaires de la centrale :**

- **Station de dessalement :**

Elle permet la production de l'eau douce (potable) à partir de l'eau salée (eau de mer) et cela a l'aide d'un traitement chimique qui permet de produire de l'eau dessalée et déminéralisée pour qu'elle soit prête à être pompé vers le condenseur où elle entre dans le cycle combinée.

L'eau produite est analysée dans un laboratoire de façon quotidienne.

- **Station de pompage d'eau de mer :**

Comme son nom l'indique ,la station va extraire de l'eau de mer à l'aide de pompe puissante qui envoie une petite partie vers la station de dessalement et une grande partie vers le condenseur où elle sert comme source froide pour condenser la vapeur .

L'eau de mer passe par plusieurs filtres pour éliminer les résidus(les algues) avant d'être pompé.

- **Station de gaz :**

C'est un réservoir géant de gaz naturel où il est prêt à être envoyé vers la chambre de combustion de la turbine à gaz.

- **Réseau incendie :**

Il contient deux pompe une électrique et l'autre diesel et qui sont prête a pompé de l'eau vers le lieu où l'incendie est signalé.

Le réseau englobe tous les compartiments de la centrale.

- **Compresseur d'air :**

Il a pour rôle d'aspirer l'air et ensuite augmenter sa pression.

L'air comprimé est utilisé pour commander la fermeture et l'ouverture des vannes (pneumatique).

- **La salle de contrôle :**

C'est là où on veille à la bonne exécution de la centrale et on gère l'état des machines et les différents problèmes qui peuvent se poser.

C'est une sorte d'intermédiaire entre l'ingénieur et la machine.

- **Les transformateurs auxiliaires :**

Contrairement au transformateur principal, les transformateurs auxiliaires diminuent la tension de 18.5KV jusqu'à 6.6KV et cela pour l'alimentation des

Auxiliaires (pompes, moteur, ventilateur, éclairage ...).

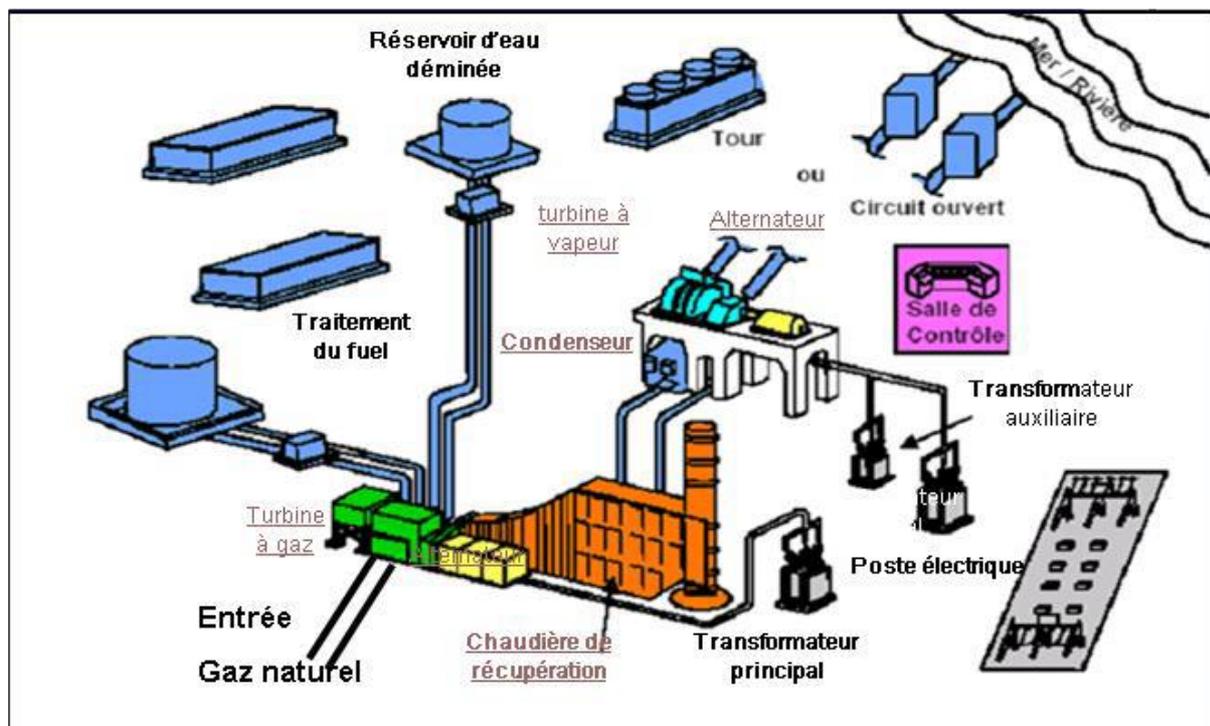


Figure 1.10 : Les principaux équipements d'une centrale à cycle combiné

## *Chapitre 2 ;*

### **Description du cycle combiné de la centrale thermique**

## II.1 Cycle thermique :

Les centrales à cycle combiné ont un rendement net d'environ 56%. Le rendement est élevé grâce à la récupération de la chaleur des gaz d'échappement de la turbine à travers des chaudières de récupération, produisant ainsi de la vapeur de haute pression, servant à l'entraînement de la turbine à vapeur.

Les gaz d'échappement refroidis sont évacués dans l'atmosphère par les cheminées. La vapeur de haute pression détendue dans la turbine à vapeur est par la suite condensée par circulation d'eau froide dans un condenseur.

Le condensat est retourné à la chaudière de récupération pour y être revalorisé, bouclant ainsi le cycle vapeur.

Pour ce type de centrale, environ deux tiers (2/3) de l'électricité est produite à partir des turbines à gaz et l'autre tiers (1/3) provient des turbines à vapeur.

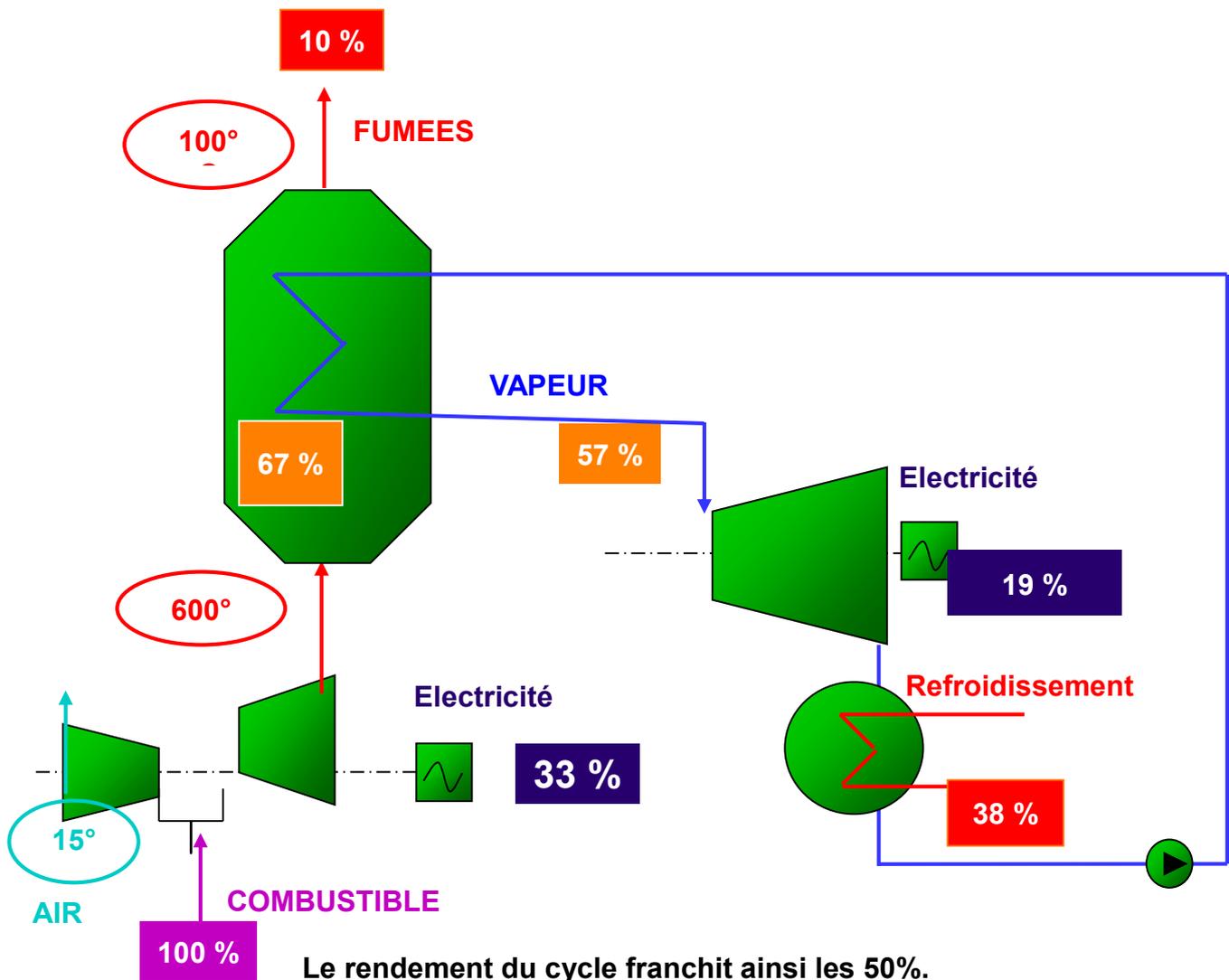


Figure II-1 : Cycle Combiné

## II.2 Eléments du Cycle Combiné

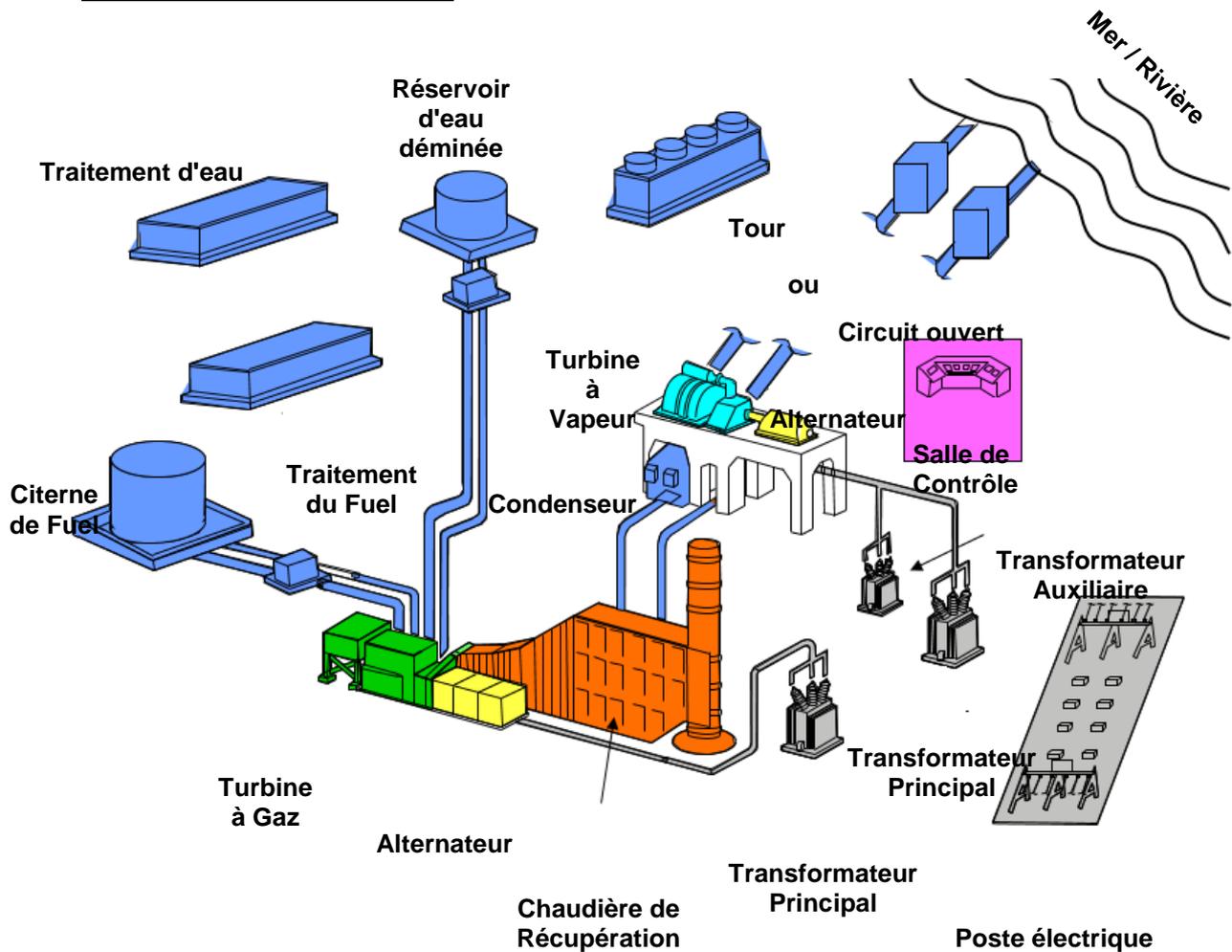


Figure II.2 : Eléments du Cycle Combiné

Les principaux équipements sont :

- La turbine à gaz
- La chaudière
- La turbine à vapeur
- Le condenseur
- L'alternateur
- Les auxiliaires constitués par:
  - Le circuit d'eau de circulation du condenseur
  - Le circuit de réfrigération de la turbine à gaz
  - Le circuit de réfrigération des alternateurs
  - Une chaudière auxiliaire
  - Le traitement électrique
  - Le traitement des eaux pour l'alimentation du circuit de vapeur
  - Les compresseurs d'alimentation du circuit d'air comprimé pour la commande des vannes et by-pass
  - Les circuits d'eau brute et d'incendie

## II.3. Les Cycles thermodynamiques

### 3.1- Cycle de Hirn

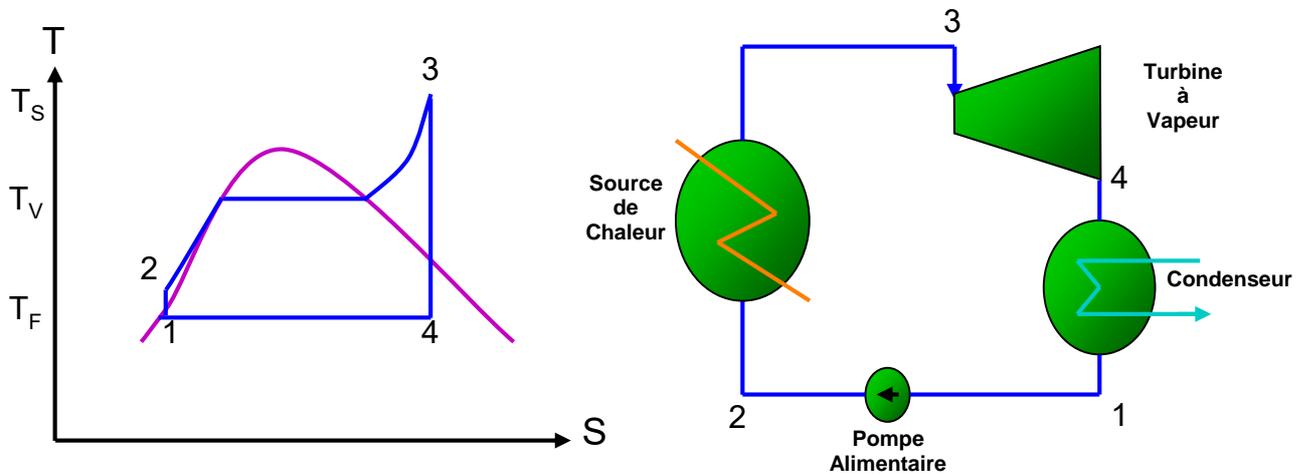


Figure 2.3.1 Cycle de Hirn

1 → 2 **Pompe Alimentaire** Mise en pression de l'eau d'extraction

2 → 3 **Source de Chaleur** Préchauffage, vaporisation, surchauffe de l'eau alimentaire

3 → 4 **Turbine à Vapeur** Détente de la vapeur

4 → 1 **Condenseur** Condensation de la vapeur

Le cycle est défini par 3 paramètres:

- **Pression de vapeur du cycle**
- **Vide au condenseur**
- **Température de surchauffe**

Une pression de vapeur élevée allonge la ligne de détente de la turbine à vapeur et donc la proportion de l'énergie qui est convertie en travail

$$p \uparrow \rightarrow \eta \uparrow$$

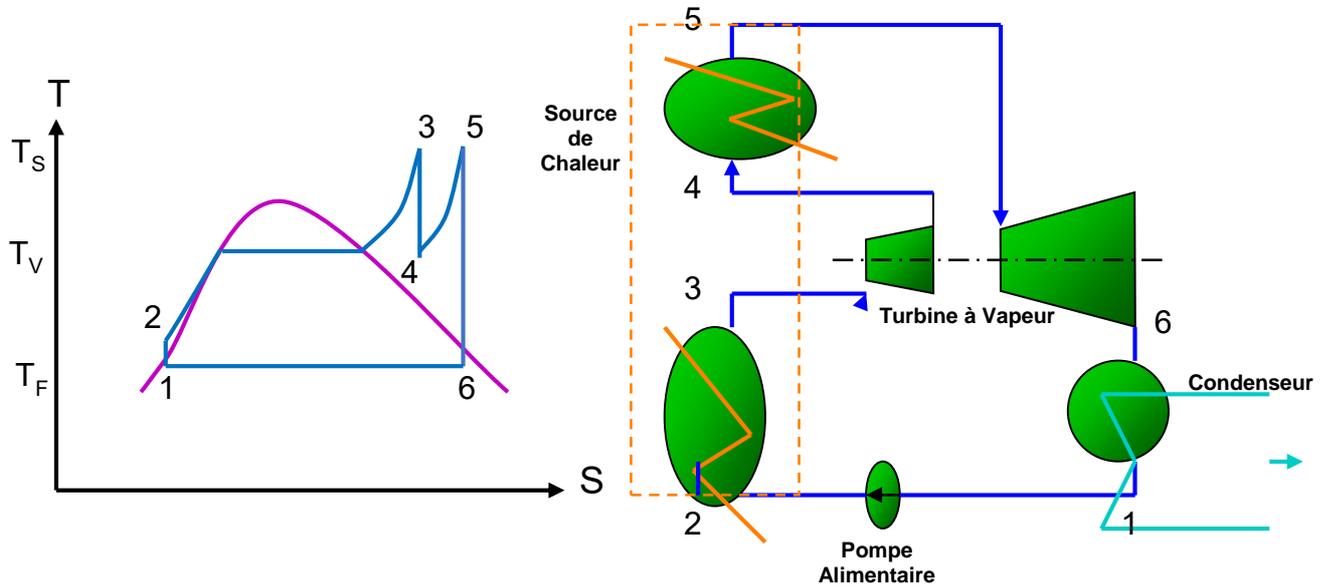
Un bon vide au condenseur a le même effet.

$$P_c \downarrow \rightarrow \eta \uparrow$$

Une température de surchauffe élevée implique pour une charge thermique donnée un débit de vapeur plus faible, donc moins de pertes au condenseur

$$T_M \uparrow \rightarrow \eta \uparrow$$

### 3.2- Cycle à Resurchauffe



**Figure 2.3.2** Cycle à Resurchauffe

- 1 → 2 **Pompe Alimentaire** Mise en pression de l'eau d'extraction
- 2 → 3 **Source de Chaleur** Préchauffage, vaporisation, surchauffe de l'eau alimentaire
- 3 → 4 **Turbine à Vapeur HP** Détente de la vapeur HP
- 4 → 5 **Source de Chaleur** Resurchauffe de la vapeur
- 5 → 6 **Turbine à Vapeur MP-BP** Détente de la vapeur resurchauffée
- 6 → 1 **Condenseur** Condensation de la vapeur

Pour une charge thermique donnée, l'existence de la resurchauffe, qui utilise une partie de cette charge, réduit la production de vapeur et donc la perte au condenseur

C'est pourquoi la resurchauffe améliore le rendement du cycle.

La resurchauffe ajoute un quatrième paramètre au cycle:

- **Pression de resurchauffe**

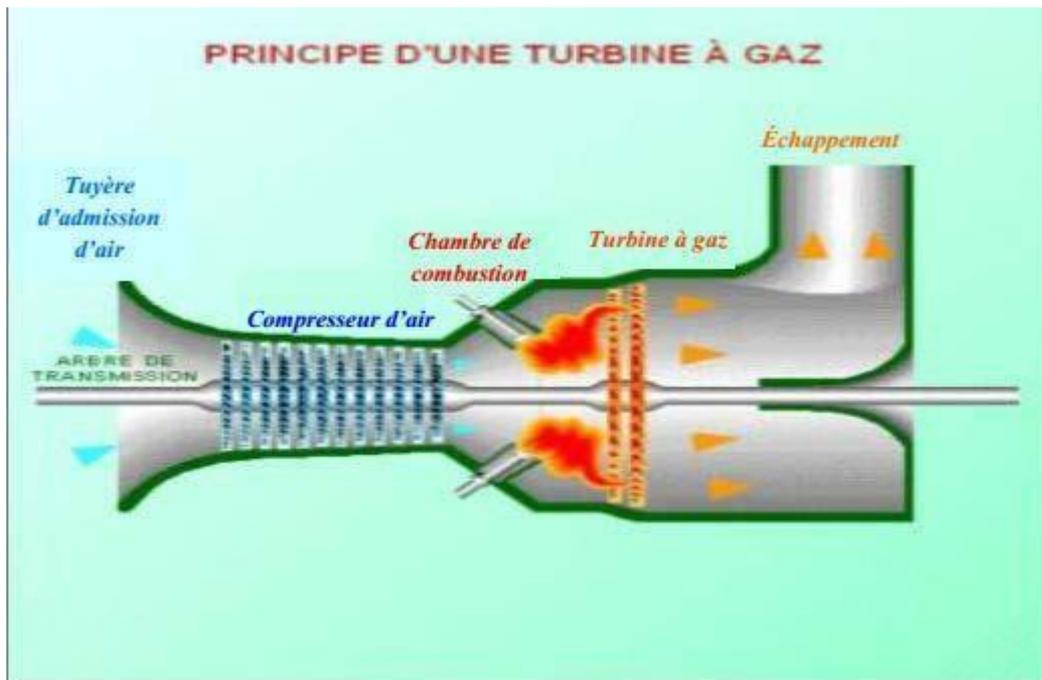
Il existe un optimum de pression de resurchauffe.

## II.4 Turbine à gaz

### 1. Principe

Selon le cycle thermodynamique réalisé par celle-ci, on distingue :

- La turbine à gaz à cycle ouvert et à combustion interne, Figure I-1. Dans ce genre d'installations l'échappement de la turbine à gaz se fait directement dans l'atmosphère.
- Si l'échappement de la turbine à gaz se fait vers une Chaudière de Récupération (HRSG) et si la vapeur produite sert au fonctionnement d'une turbine à vapeur, on parle alors de centrale à cycle combiné.
- Lorsque la vapeur est utilisée pour d'autres processus, au lieu de la turbine à vapeur, on utilise le terme de cogénération (production d'électricité et de vapeur) pour décrire cette installation [2]



**Figure 2.4** : Principe d'un turbine à gaz

Le cycle thermodynamique d'une turbine à gaz est appelé cycle de Brayton.

Les quatre phases de ce cycle sont représentées sur Figure I-2.

Le diagramme T-H est un moyen commode pour illustrer et analyser le comportement d'une centrale. Il permet l'analyse des cycles thermodynamiques car il indique la quantité de chaleur nécessaire pour réaliser un processus durant un cycle.

Les diverses transformations thermodynamiques sont représentées sur la Figure I-2. La compression de l'air est représentée par la ligne 1-2, est accompagnée d'une augmentation de la température et de la pression, ce qui en gendre une élévation de l'enthalpie.

La ligne 2-3 représente la combustion à pression constante. La température du gaz résultant de la combustion s'élève fortement par rapport à la température de l'air en sortie du compresseur.

La ligne 3-4, correspond à la détente et au refroidissement du gaz qui traverse la turbine. L'énergie du gaz chaud sous pression est utilisée pour effectuer le travail.

La ligne 4-1, représente le refroidissement du gaz chaud qui s'échappe dans l'atmosphère.

La quantité de chaleur nécessaire au cycle de Brayton est représentée par la zone située sous la ligne 2-3. La zone, sous la ligne 4-1, représente la fraction de chaleur qui est rejetée. La zone séparant ces deux lignes représente la chaleur convertie en une énergie mécanique utile.

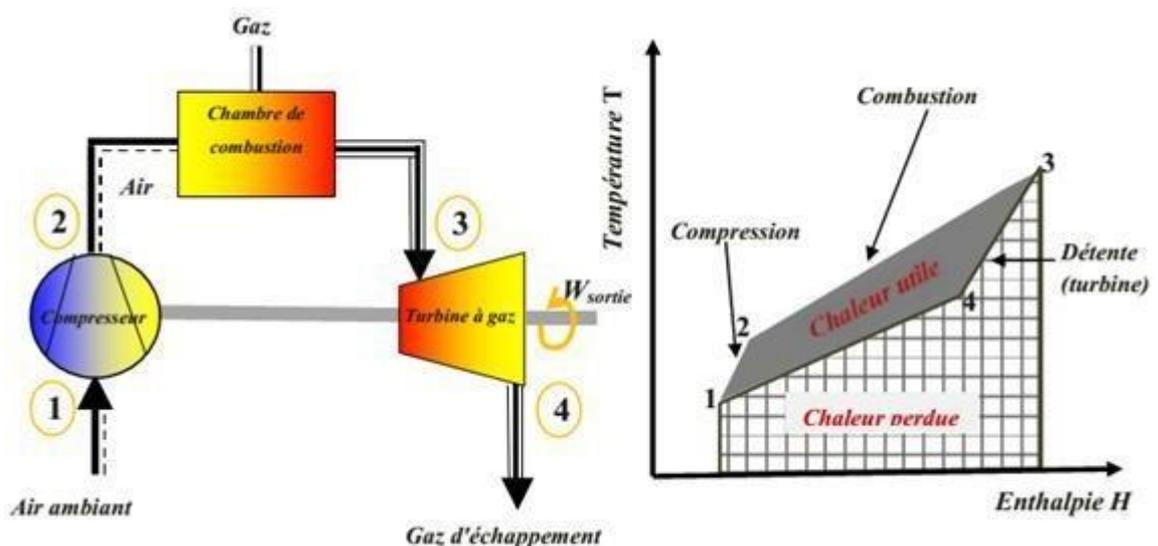


Figure 2.5 : Schéma d'une turbine à gaz

## 2. Cycle idéal de Brayton

La Figure 2.6 montrent les diagrammes (T-s) et (P-v), respectivement, pour le cycle idéal de Brayton. Toutes les transformations sont réversibles, sans frottement, sans perte de charge et sans perte de chaleur. La compression et la détente sont isentropiques, et la combustion et la détente sont isobares. Chaque cycle de Brayton peut être caractérisé par trois paramètres significatifs:

-le rapport de pression (taux de compression),

$$\tau_c = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$$

- la température de combustion, comme étant la température la plus élevée du cycle,  $T_3$ .
- le rendement thermique du cycle

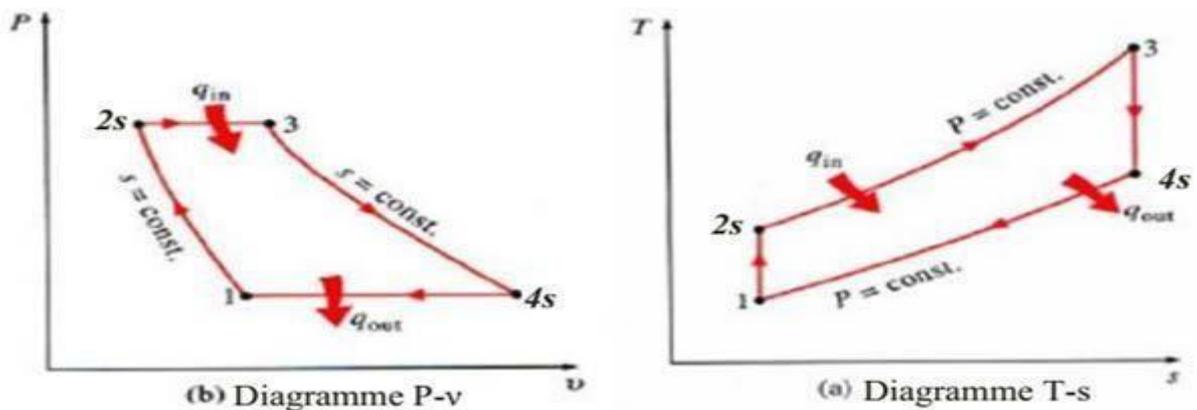


Figure 2.6 : Cycle idéal de Brayton

## 3. Cycle réel de Brayton

Dans le cycle réel de Brayton les transformations thermodynamiques sont irréversibles à cause du frottement visqueux. La compression et la détente ne sont plus isentropiques, et la combustion et le refroidissement ne sont plus à pressions constantes (Figure 2.7).

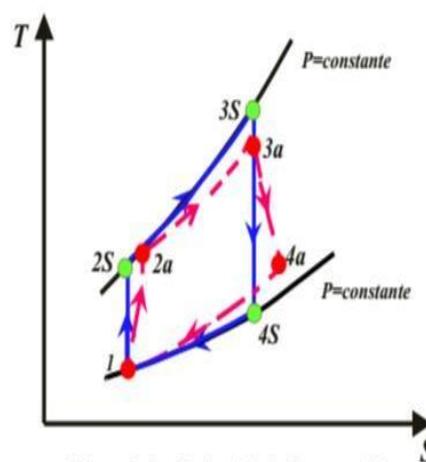


Figure 2.7 : Cycle réel de Brayton

## **II.5 Turbine à Vapeur**

### **5.1 Technologies**

Dans une turbine à action, la détente se fait dans l'aube directrice, transformant l'énergie de la vapeur en vitesse; cette vitesse est transformée en travail dans l'aube mobile.

Dans une turbine à réaction, une partie de la détente se fait dans l'aube mobile, contribuant à mettre celle-ci en rotation.

Une turbine à action se caractérise par des étages peu nombreux, mais un rotor de diamètre important.

Une turbine à réaction, au contraire, a beaucoup d'étages sur un rotor de faible diamètre; elle nécessite en outre des butées puissantes



**a- une turbine à réaction**

**b- une turbine à action**

**Figure 2.8 : une turbine à action et à réaction**

### **5.2 Dimensionnement et limitations du corps HP**

La température de surchauffe de la vapeur est limitée par le matériau constitutif des organes d'admission de la turbine à vapeur.

La pression du cycle est limitée par les organes d'admission aussi.

De plus, sur les petites turbines, une pression élevée nécessite de très faibles sections de passage et donc de très petites ailettes, ce qui augmente significativement les pertes par frottement et dégrade ainsi le rendement de la turbine.

Une solution pour augmenter la taille des ailettes dans ce cas est d'utiliser un rotor de faible diamètre, souvent associé à la technologie à réaction ou, pour une turbine à action, d'augmenter la vitesse de rotation de la machine.

Sinon, il faut réduire la pression du cycle.

### **5.3 Dimensionnement et limitations du corps BP**

L'échappement de la turbine doit offrir une section de passage suffisante pour que la vitesse de la vapeur reste raisonnable: en effet, l'énergie cinétique de la vapeur est perdue.

Le choix de l'échappement, caractérisé par la hauteur de la dernière ailette, détermine le corps BP.

Si la plus grande ailette ne suffit pas, il faut choisir un échappement à double flux, plus cher et qui impose un échappement latéral.

Lorsque l'échappement est latéral, le condenseur est en général placé sous la turbine, ce qui occasionne des travaux supplémentaires de génie civil et un surcoût; de plus, l'écoulement est perturbé et le rendement de la turbine à vapeur légèrement diminué.

Un échappement axial est donc préférable quand il est possible; ce n'est pas le cas, par exemple, pour un double flux, ni pour un 109FA SS à cause de l'alternateur.

Paradoxalement, le corps BP de la turbine induit aussi une limitation sur la pression de la vapeur HP, à cause du phénomène d'érosion.

En effet, la vapeur à l'échappement de la turbine est en principe humide: elle entraîne des gouttelettes d'eau. Ces gouttelettes d'eau ont une vitesse et une inertie différente de la vapeur, de sorte qu'elles impactent les aubes au lieu de suivre la veine fluide.

Ces impacts conduisent à une érosion de la dernière ailette, d'autant plus importante que le titre en eau de la vapeur est élevé. En pratique, les aubages peuvent supporter un titre en eau maximal de 10 à 15%, suivant les aubages.

Or plus la pression de la vapeur HP est élevée, plus le titre en eau à l'échappement est important; la pression HP ne doit donc pas dépasser une certaine valeur.

Cette limitation concerne cependant surtout les cycles combinés avec postcombustion.

### **II.6 Source Froide**

La source froide est généralement hors du scope de GE, mais c'est cependant un élément constitutifs du cycle: c'est elle qui condense la vapeur et permet ainsi de boucler le cycle.

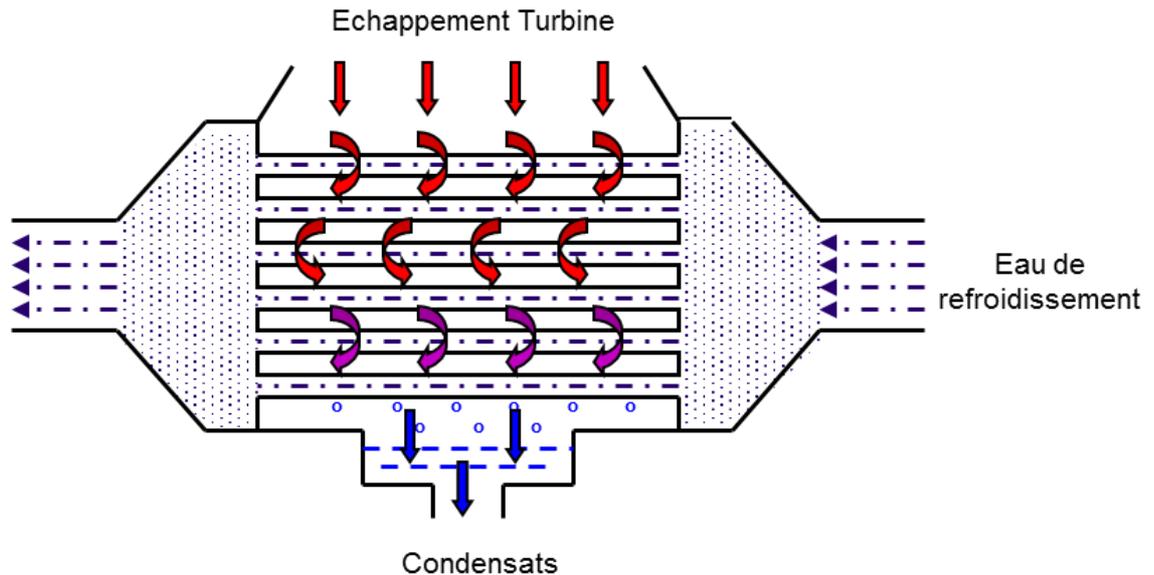
Suivant le débit d'eau de refroidissement disponible sur le site, trois grands types de sources froides peuvent être utilisés:

	Débit nécessaire pour un Cycle Combiné de 300MW):
• condenseur en circuit ouvert	( 20 000 m3/h )
• condenseur sur tour	( 400 m3/h )
• aérocondenseur	( 0 m3/h )

## 6.1 - Condenser en circuit ouvert

Le condenseur en circuit ouvert se compose simplement d'une coque dans laquelle arrive la vapeur, traversée par des faisceaux de tubes refroidis par l'eau; la vapeur se condense sur ces tubes, ce qui crée le vide dans le condenseur.

Le condenseur peut jouer aussi le rôle de dégazeur: en effet, les gaz dissous contenus dans la vapeur ne se condensent pas toujours avec elle, en particulier dans les zones les plus froides du condenseur. Les gaz, piégés peuvent ainsi être évacués.



**Figure 2.9 Le condenseur en circuit ouvert**

Caractéristiques du système:

- réchauffement:  $r = 5 \text{ à } 8^\circ\text{C}$
- pincement:  $q = 3 \text{ à } 4^\circ\text{C}$

Température de condensation:

$$T_C = T_E + r + q$$

## 6.2 Condenser sur tour

Lorsque le site ne dispose pas d'un débit d'eau suffisant pour refroidir directement le condenseur, il est encore possible de refroidir celui-ci par un circuit d'eau secondaire, semi-fermé, lui-même refroidi par l'air ambiant dans une tour de refroidissement.

Les tours utilisées par les cycles combinés sont en général des tours humides: la chaleur est surtout évacuée par la vaporisation d'une partie de l'eau, absorbée par l'air.

Ce phénomène crée parfois un panache au-dessus de la tour; pour l'éviter, une tour hybride est parfois choisie.

Dans tous les cas, un appoint d'eau est nécessaire pour compenser l'évaporation.

La tour humide est évidemment plus chère que le circuit ouvert; elle est aussi moins performante: la température de condensation est:

$$TC = TH + A + r + q$$

Caractéristiques du système:

- $r = 10$  à  $12^{\circ}\text{C}$
- $q = 3$  à  $4^{\circ}\text{C}$
- $A = 6$  à  $10^{\circ}\text{C}$

$A = T_E - T_H$ : approche de la tour

### **6.3 Aero condenser**

Lorsque le site ne dispose que de très peu d'eau, le condenseur est remplacé par un aérocondenseur, directement refroidi par l'air ambiant.

L'aérocondenseur se compose de faisceaux de tubes disposés en nappes inclinées, dans lesquels la vapeur se condense; ces faisceaux de tubes sont refroidis par l'air, soufflé par des ventilateurs.

La vapeur est amenée de la turbine jusqu'à l'aérocondenseur par une gaine de gros diamètre, fournie en principe par le fabricant de l'aérocondenseur.

L'aérocondenseur est un système coûteux, encombrant, bruyant à cause des ventilateurs et peu performant car l'échange entre l'air et la vapeur est assez mauvaise.

Il a en outre l'inconvénient de générer des variations de vide très importantes, suivant la température d'air ambiant, ce qui est contraignant pour la turbine.

Caractéristiques du système:

- $A = 25$  à  $30^{\circ}\text{C}$

$A = T_c - T_s$ : approche de l'aérocondenseur

Température de condensation:

$$TC = TS + A$$

### **II.7 Chaudière de Récupération**

La chaudière de récupération est simplement un échangeur entre les fumées chaudes de la turbine à gaz et l'eau ou la vapeur.

Elle se compose principalement d'une gaine, dans laquelle circulent les fumées, d'échangeurs constitués de nappes de tubes traversés par l'eau ou la vapeur et d'un ou plusieurs ballons.

Les échangeurs sont de trois types différents, de fonctions différentes aussi:

- Les économiseurs réchauffent l'eau alimentaire jusqu'au voisinage de la saturation et l'envoient dans le ballon.
- Les évaporateurs puisent de l'eau dans le ballon, en vaporisent une partie et la renvoient dans le ballon. Cette circulation en boucle fermée peut s'effectuer naturellement grâce à la différence de masse entre l'eau et la vapeur ou bien nécessiter l'assistance d'une pompe de circulation.
- Les surchauffeurs sont alimentés par la phase vapeur du ballon et surchauffent cette vapeur avant de l'envoyer vers la turbine à vapeur; les resurchauffeurs, dans un cycle à resurchauffe, sont identiques mais alimentés par la turbine à vapeur. Exposés aux températures les plus élevées, ils sont généralement en acier de type T11, T22 ou T91.

### Horizontal

- Echangeurs verticaux
- Circulation naturelle
- Température des fumées non homogène dans une section

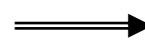


**Echange moins efficace**  
**Contraintes de dilatation**

- Structure relativement légère
- Maintenance plus facile

### Vertical

- Echangeurs horizontaux
- Circulation assistée



**Pompe de circulation**

- Température des fumées homogène dans une section
- Structure importante



**Surcoût**

- Encombrement au sol légèrement plus faible

La température modérée des fumées impose une disposition optimale des échangeurs, rangés par températures décroissantes.

Le débit de vapeur générée par la chaudière est limité par le point de pincement (PP).

L'écart de sécurité (ES) permet de prévenir un début de vaporisation dans l'économiseur.

A haute pression, la chaudière produit peu de vapeur, les fumées se refroidissent peu.

A basse pression, le rendement du cycle vapeur est faible.

Pour une température de fumées donnée, il existe donc une pression optimale du cycle.

# *Chapitre 3;*

## **Paramètres thermodynamique d'un cycle vapeur**

### III.1 La chaudière (HRSG) :

Les trois turbines à gaz de la centrale sont chacune équipées d'une chaudière de récupération incluant des brûleurs d'appoint cette dernière produite de la vapeur à trois niveau de pression différents, ce qui permet une récupération très poussé de l'énergie thermique contenue dans le gaz d'échappement en limitant au maximum les pertes d'énergie à la cheminé. Les chaudières de récupération seront installées à l'extérieur de tranches principales. La hauteur minimales de chaque cheminé (environ 55m) d'ou sortent les gaz d'échappement correspondra à environ 1.9 fois celle du toit du tranche principal. La cheminée sera dotée de système de suivi contenu des émissions.

Les caractéristiques typiques de la vapeur produite par chacun des trois chaudières de récupération sont présentées dans le tableau suivant :

	Parameter	Unité	Valeur
Haute Pression	pression	bar	124
	temperature	°C	565
	Debit	t/h	465
Moyenne pression	pression	bar	34
	temperature	°C	565
	Debit	t/h	10
Basse Pression	pression	bar	4
	temperature	°C	302
	Debit	t/h	7

**Tableau3.1** : caractéristiques de la vapeur produite par chacun des chaudières de récupération

Le principe de fonctionnement :

La chaudière de récupération est constituée de trois échangeurs montés en série : l'économiseur, l'évaporateur et le surchauffeur. Ces échangeurs sont placés perpendiculairement dans un carneau de fumée.

La chaudière de récupération remplit trois fonctions représentées par l'économiseur (l'eau d'alimentation est chauffée jusqu'à la température de vaporisation à la pression correspondante), par l'évaporation (l'eau est vaporisée), par la surchauffe (la vapeur est surchauffée à la température désirée). Elle comporte trois échangeurs, chaque échangeur correspond à une pression.

### **III.2 Bases de la thermodynamique à la vapeur**

#### **1- Introduction**

La vapeur est le gaz résultant de l'évaporation de l'eau. On peut différencier la vapeur sèche (également vapeur surchauffée), la vapeur saturée ou la vapeur humide (également la vapeur sous-refroidie).

L'état de vapeur est généralement caractérisé par son enthalpie et son entropie.

L'état de la vapeur est décrit dans un diagramme thermodynamique appelé «diagramme de Mollier». Ces diagrammes sont généralement enthalpie de vapeur vs entropie de vapeur, mais nous pouvons également trouver température de vapeur vs entropie de vapeur.

Le diagramme de Mollier donne l'état de la vapeur (liquide, gaz ou mélange des deux) en fonction de deux variables d'état (pression, température, enthalpie, entropie, volume spécifique...).

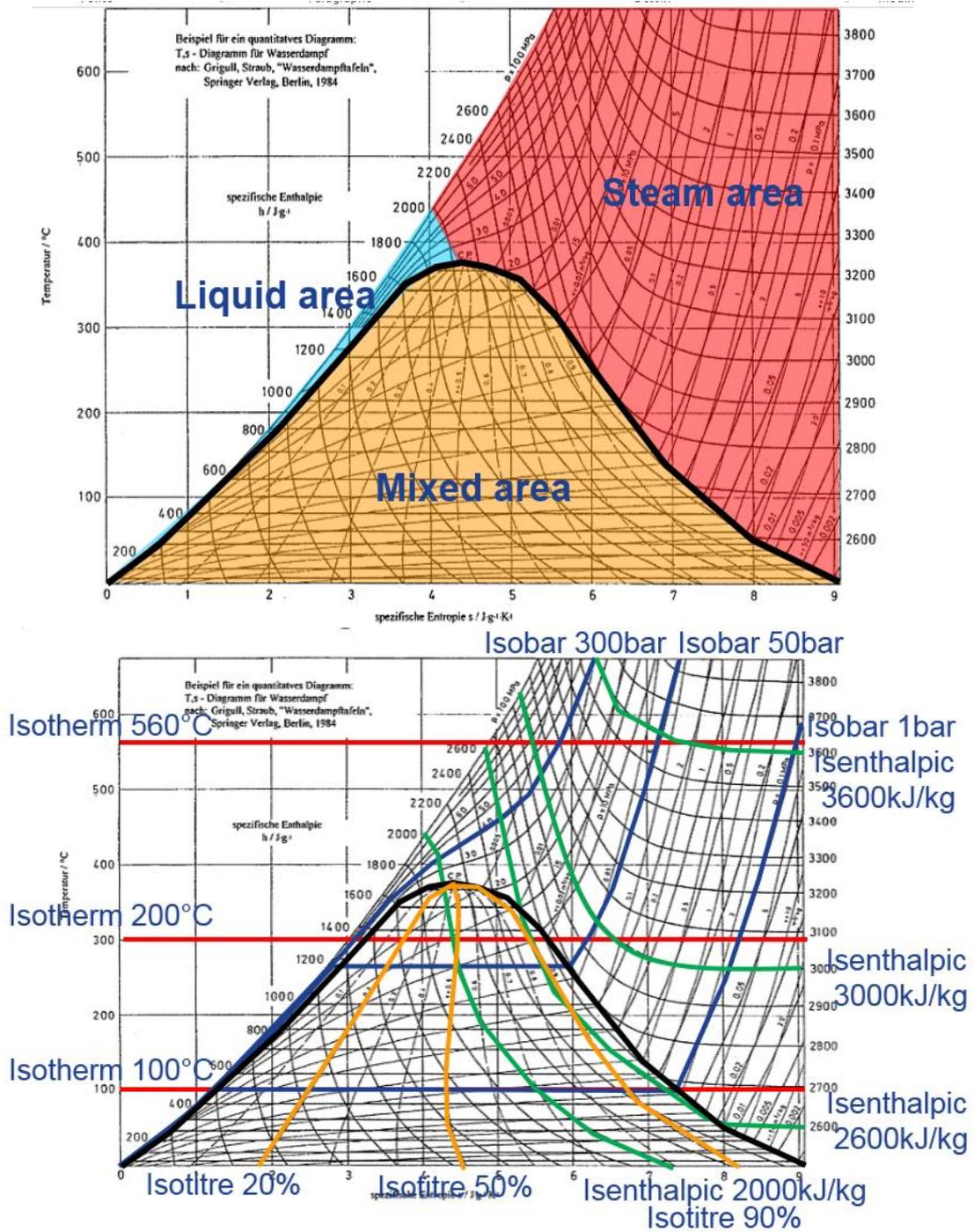
Dans certains cas, une troisième variable peut être nécessaire pour trouver l'état de la vapeur.

#### **2- L'enthalpie et l'entropie**

L'enthalpie caractérise l'énergie de la vapeur. Il est exprimé en KJ / kg de vapeur. Cela dépend de la température de la vapeur, mais aussi de la pression de la vapeur ( $H = U + pV$ ).

L'entropie est une mesure du trouble à l'intérieur d'un fluide. Fondamentalement, l'entropie est minimale dans les solides où les atomes ne peuvent guère se déplacer et augmente lorsque la température augmente. L'entropie est maximale dans la vapeur

surchauffée. Pour une température donnée, l'entropie diminue lorsque la pression augmente. Il est exprimé en  $\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}$ .

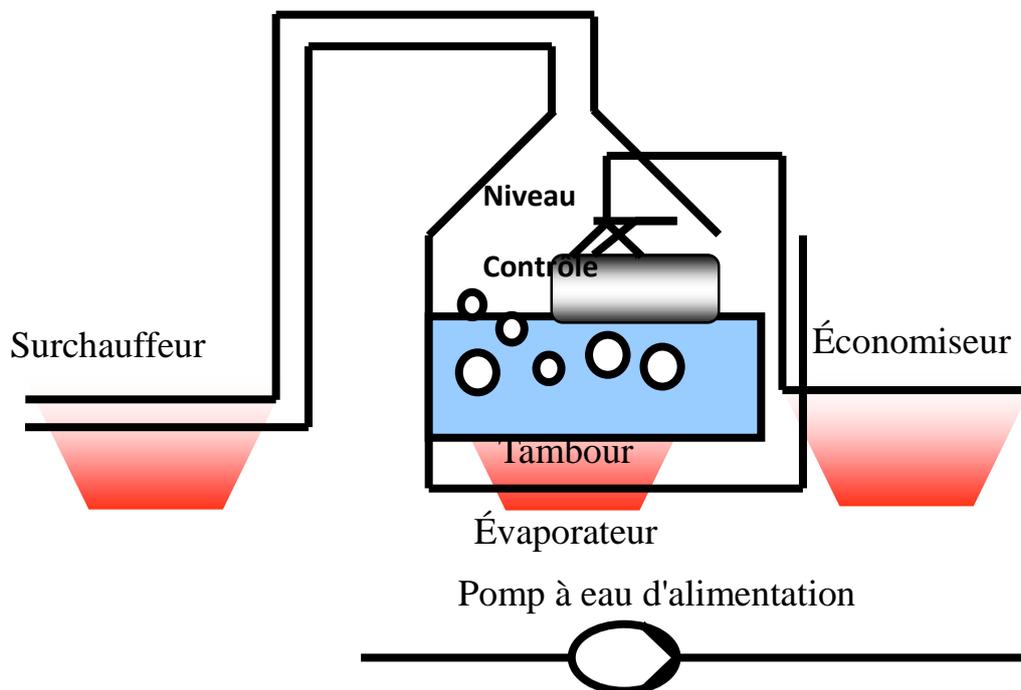


- Figure3. 1et 2 lire le diagramme de Mollier

### **III.3 Production de vapeur utilise**

#### **1- produire de la vapeur**

Fondamentalement, la vapeur est produite en faisant bouillir de l'eau pure grâce à une source d'énergie thermique. Pour une pression donnée (par exemple 1 bar), le processus d'ébullition est isotherme. C'est-à-dire que la température de l'eau restant dans la chaudière sera toujours de 100 ° C. Cette température est également appelée température de saturation à 1 bar.



**Figure 3.3 :** Description produire de la vapeur

#### **2.1- Produire de la vapeur haute pression**

En ajoutant une contre-pression à la sortie de la surchauffeur (vanne ou turbine à vapeur par exemple), la pression à l'intérieur du tambour augmentera. Suite à l'augmentation de la pression, la température de saturation à l'intérieur du tambour augmentera comme suit:

$$P_{sat} \approx \left( \frac{T}{100} \right)^4 \text{ between } 100 \text{ et } 200^\circ\text{C}$$

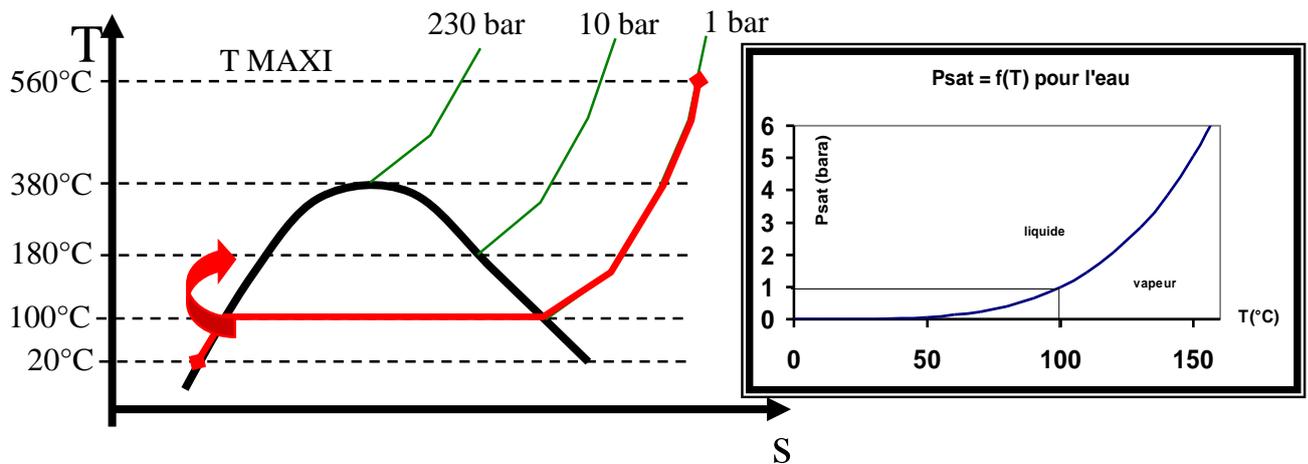


Figure 3.4 : la température et pression de saturation à l'intérieur du tambour

## 2- Production industrielle de vapeur

### 2.1 L'appareil qui produit de la vapeur en CC

La vapeur en CC est générée dans le HRSG (Générateur de vapeur de récupération de chaleur).

Fondamentalement, le HRSG utilise l'énergie des gaz d'échappement pour produire de la vapeur. La vapeur est ensuite orientée vers la turbine à vapeur ou d'autres applications à vapeur (chauffage, procédés...).

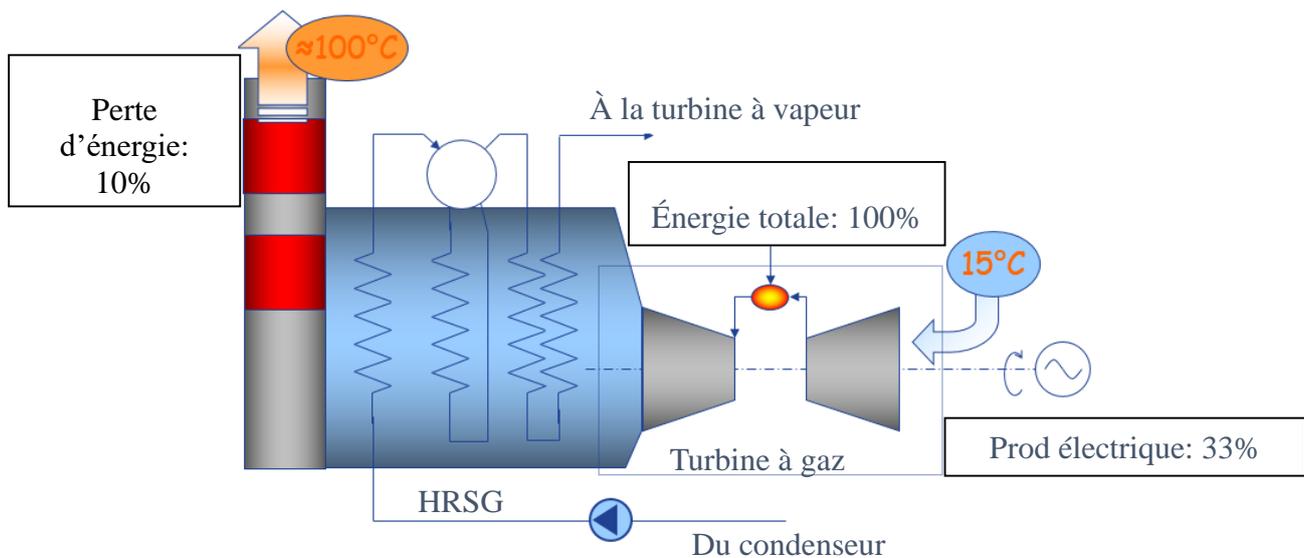


Figure 3.5 : l'appareil qui produit de la vapeur

### **III.4 HRSG: Notions de conception**

Dans le HRSG, la température de la fumée va imposer une pression maximale de fonctionnement (comme la température de pression et de saturation sont liées). Il impose également une réflexion sur la meilleure disposition des différents échangeurs de chaleur, du plus chaud (super chauffage) au plus cool (économiseur).

Nous définissons également deux points de conception :

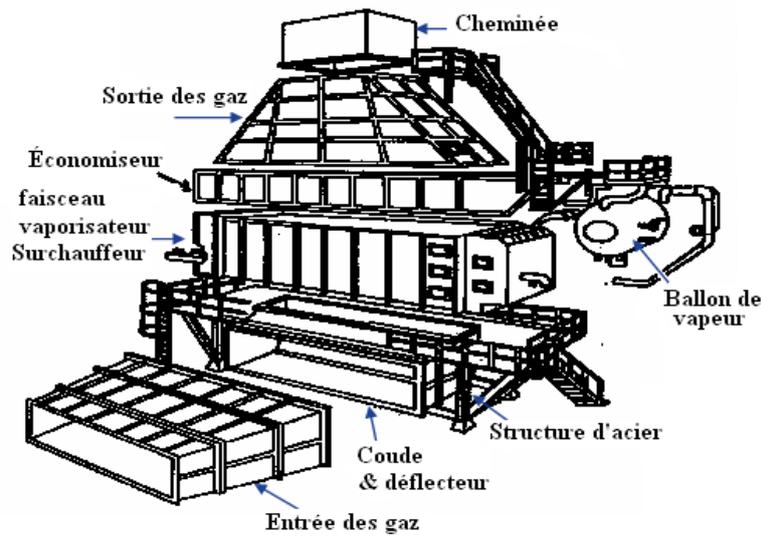
- Point de pincement (PP) : c'est l'écart minimum entre la température de la chaudière et la température la plus froide des gaz d'échappement sur l'évaporateur. Le PP impose un débit de vapeur maximal
- Point d'approche (AP) : c'est l'écart minimal entre la température de la chaudière et la sortie d'économiseur. L'AP empêche l'eau de se vaporiser à l'intérieur de l'économiseur.

La température maximale de la vapeur à la sortie surchauffée est également limitée par des contraintes en acier allié . En effet, la vapeur qui circule dans les échangeurs refroidit et les protège des effets thermiques dus à la température des gaz d'échappement.

Une température maximale largement acceptée pour la vapeur dans le tuyau en acier allié est d'environ 565 °C (420 °C pour l'acier au carbone).

Une température plus élevée affecterait la cristallographie des métaux et provoquerait une rupture thermique des tuyaux HRSG.

#### **4.1 Chaudière à débit de gaz verticale**

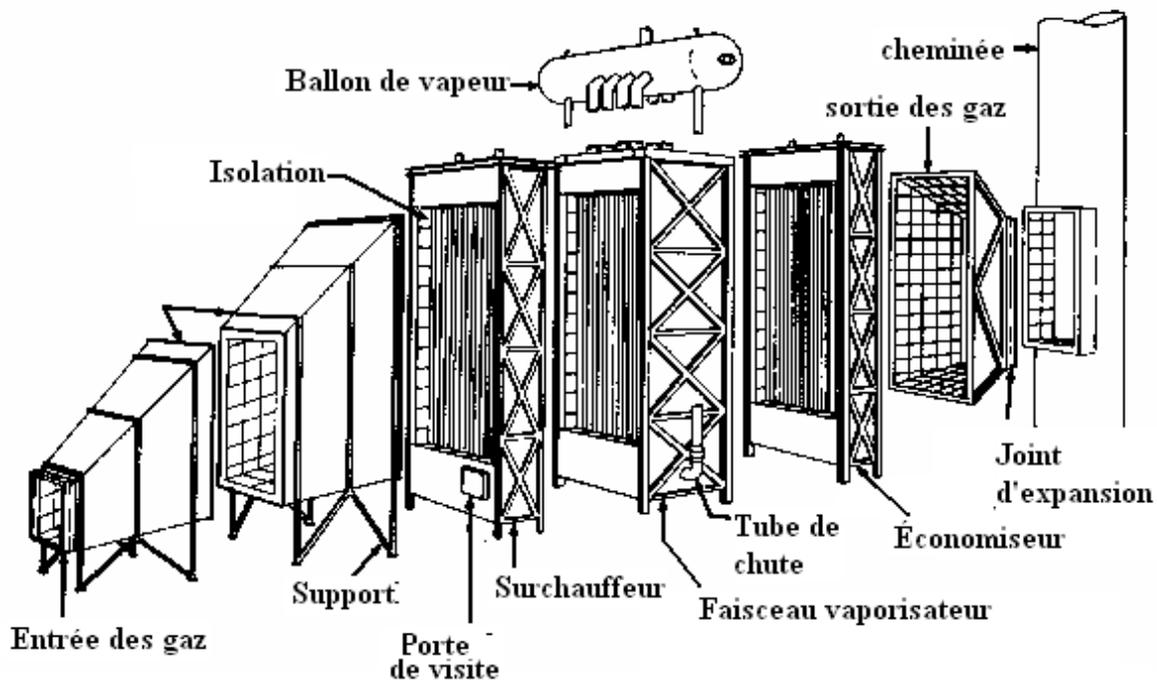


**Figure 3-6 : Chaudière à débit de gaz vertical**

Les chaudières ayant un débit de gaz vertical utilisent en général, des tubes horizontaux connectés par des coudes de retour aux tubes soutenus en plusieurs endroits le long des tubes par des tôles de tube. La plupart de ces utilisations exigent une pompe de circulation dans les sections de la chaudière qui génèrent de la vapeur. La pompe de circulation assure une distribution uniforme de l'eau à de multiples circuits parallèles générant la vapeur. Les pompes sont habituellement dimensionnées de manière à conserver un rapport de circulation de 4 à 1 sous condition de vaporisation maximale.

Les chaudières ayant un débit de gaz horizontal utilisent des tubes verticaux connectés aux tubes collecteurs en haut et en bas. Les assemblages de tubes et de tubes collecteurs peuvent être soit soutenus par le haut, soit soutenus par le bas. Bien que les tubes se soutiennent de façon autonome en direction verticale, des immobilisations latérales sont nécessaires pour contrôler les vibrations causées par le débit de gaz. La circulation naturelle dans les sections à génération de vapeur produit des rapports de circulations élevées sans l'utilisation de pompes.

#### **4.2 Chaudière à débit de gaz horizontal**



**Figure 3-7** Chaudière à débit de gaz horizontal

### 4.3 Niveaux de pression

- Niveaux de pression: 1 niveau

Le choix de la pression de l'entrée à l'entrée ST imposera la température à l'intérieur de l'évaporateur.

Cependant, ce choix peut ne pas permettre de récupérer toute l'énergie disponible dans les fumées. Dans ce cas, le reste de l'énergie de fumée est perdu dans la pile.

- Niveaux de pression: 2 niveaux

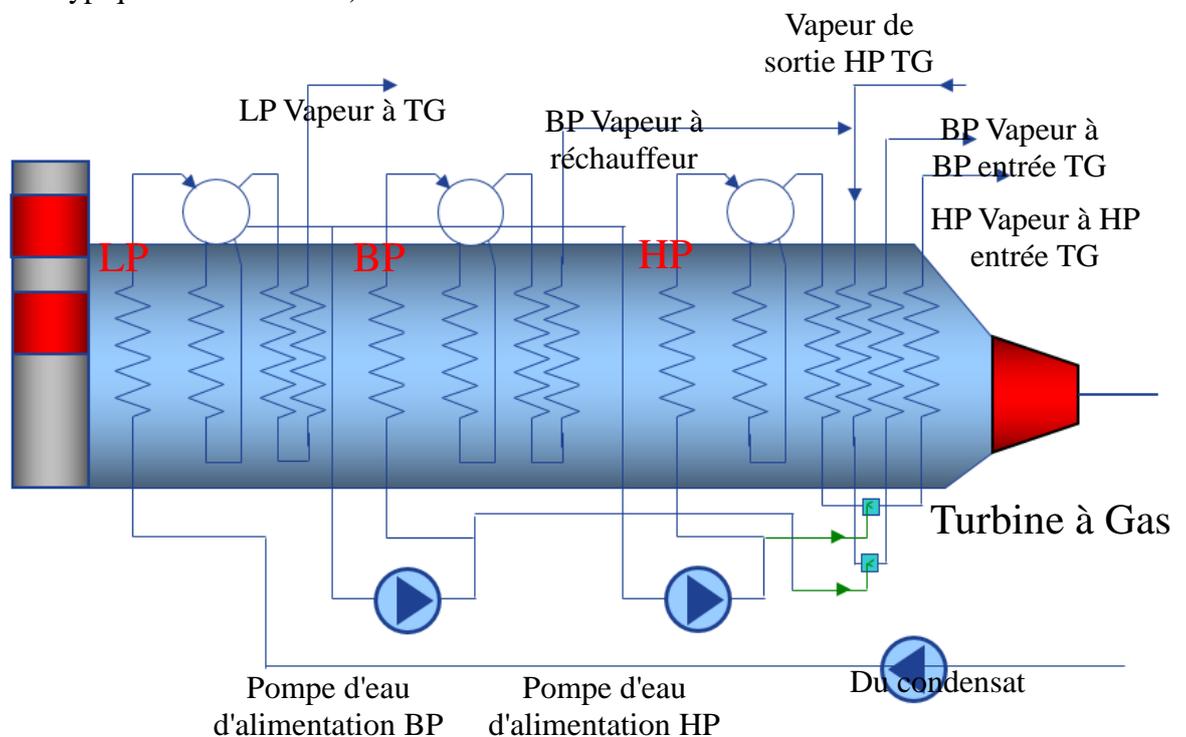
Après le dernier échangeur, la température des fumées sera à froid pour produire de la vapeur à la même pression que dans le tambour. Pour continuer à réduire les pertes d'exercice, il faut ajouter un nouveau tambour, avec une pression de travail inférieure (donc temps de saturation inférieure!).

- Niveaux de pression: 3 niveaux

Dans les grands cycles combinés modernes, nous utilisons généralement 3 niveaux de pression, plus un réchauffeur. Le réchauffeur est une surchauffeur qui réchauffe la vapeur surchauffée de la sortie de la turbine à vapeur HP et la renvoie à l'entrée de la turbine à vapeur IP.

Avec ce type d'arrangement, l'efficacité globale du CC peut atteindre 58%.

Remarque : La température des gaz ne doit pas être refroidie en dessous d'une certaine température pour éviter la condensation d'acide sulfurique sur l'économiseur de LP (température typique  $\sim 80^{\circ}\text{C}$  sur NG)



**Figure 3-8** : Niveaux de pression

### **III.5 Dimensionnement**

Les principaux paramètres du cycle vapeur sont optimisés pour un point de fonctionnement moyen, en général le point de garantie: c'est le point de design.

Lorsque les conditions de fonctionnement s'éloignent de ce point de design, le comportement de la turbine à gaz varie et le cycle vapeur doit alors s'adapter à ces nouvelles conditions.

Il faut pour cela vérifier que chacun des équipements du cycle est capable de fonctionner dans toutes les conditions auxquelles il peut être soumis.

Dans la plupart des cas, ces conditions se traduisent pour un élément donné par une plage de débit, de température et de pression.

### **5.1 Etablissement des pressions**

C'est la turbine à gaz qui impose globalement le débit de vapeur généré, conséquence directe de la charge thermique contenue dans les fumées.

En revanche, c'est la turbine à vapeur qui impose la pression de la vapeur dans l'ensemble du cycle: si elle reçoit un débit de vapeur supérieur au débit du design, la pression monte en amont de la turbine et inversement, suivant la loi de Stodola:

$$\frac{G\sqrt{T}}{p} = \frac{G_0\sqrt{T_0}}{p_0}$$

Cette pression est retransmise par les tuyauteries, puis les surchauffeurs, au ballon de la chaudière, ce qui modifie d'ailleurs légèrement le débit de vapeur généré...

Dans le cas de la vapeur HP, un équilibre s'établit ainsi entre la chaudière et la turbine. Pour les niveaux MP et BP, en revanche, la pression atteinte dépend surtout du débit de vapeur HP, prépondérant.

### **5.2 Pression de vapor HP**

La pression de vapeur HP ne doit en aucun cas dépasser le maximum admissible par la turbine; dans le cas contraire, il faut réduire la pression HP de design.

La pression HP est d'autre part maintenue au-dessus d'un certain seuil par les organes d'admission de la TV, pour éviter les survitesses dans les tuyauteries et les échangeurs de la chaudière.

### **5.3 Pression au condenser**

La pression au condenseur doit dans tous les cas rester inférieure au maximum admissible par la turbine; dans le cas contraire, qui peut se produire en base chaude avec un aérocondenseur, il faut soit baisser le vide de design et donc augmenter la taille de l'aérocondenseur, soit changer le corps BP de la turbine à vapeur.

#### **5.4 Température de vapor HP**

La température de vapeur HP est limitée par la chaudière au moyen d'une désurchauffe à la valeur maximale admissible par la turbine.

Cette désurchauffe est elle-même dimensionnée par les cas où la température des fumées est maximale et le débit associé soit maximal, soit minimal, c'est-à-dire aux fonctionnements MFIL et BLF de la TG, à chaud.

#### **5.5 Température d'eau alimentaire**

La température d'eau à l'entrée de la chaudière doit toujours être supérieure au point de rosée de l'acide sulfurique contenu dans les fumées; pour cela, l'eau sortant de l'économiseur BP est recirculée par une pompe vers l'entrée. En marche au fuel, un by-pass envoie une partie de l'eau froide directement dans le ballon.

### **III.6 Performances**

Les performances du cycle combiné dépendent:

- du modèle de turbine à gaz
- des conditions ambiantes
- de l'optimisation du cycle
- des options éventuelles
- du combustible utilisé

Unite	Cycle Vapeur	Puissance brute (MW)	Rendement brut	Puissance nette (MW)	Rendement net
S106B	3 Pressions sans resurchauffe	65.4	49.8 %	64.3	49.0 %
S206B		132.6	50.5 %	130.7	49.8 %
S406B		265.4	50.6 %	261.3	49.8 %
S106C		63.6	54.7 %	62.8	54.0 %
S206C		128.3	55.1 %	126.7	54.4 %
S109E		196.1	52.8 %	193.2	52.0 %
S209E		397.1	53.5 %	391.4	52.7 %
S106FA	3 Pressions Resurchauffe Réchauffage du gaz	119.5	55.5 %	117.7	54.7 %
S206FA		241.4	56.1 %	237.9	55.3 %
S109FA		396.0	57.5 %	390.8	56.7 %
S209FA		797.4	57.9 %	786.9	57.1 %
S109H	3 Pressions Resurchauffe Réchauffage du gaz Refroidissement TG			480.0	60.0 %

Tableaux 3.2 : modèles de turbine à gaz

Notes: 1. Conditions de site: 15°C, 1013 mbar, 60% RH

2. Combustible: Gaz Naturel

3. Vide au condenseur: 40 mbar

### 6.1 Variation des performances avec le cycle vapeur

#### STAG 209<sup>E</sup>

	<b>Cycle Vapeur Puissance(%)</b>	<b>Rendement(pts)</b>
3 Pressions Resurchauffe	<b>+0.7</b>	<b>+0.4</b>
3 Pressions sans resurchauffe	<b>Base</b>	<b>Base</b>
2 Pressions sans resurchauffe	<b>-1.0</b>	<b>-0.5</b>
1 Pression sans resurchauffe	<b>-4.7</b>	<b>-2.4</b>

### **STAG 109FA**

	<b>Cycle Vapeur Puissance(%)</b>	<b>Rendement (pts)</b>
3 Pressions Resurchauffe	<b>Base</b>	<b>Base</b>
2 Pressions Resurchauffe	<b>-1.1</b>	<b>-0.6</b>
3 Pressions sans resurchauffe	<b>-1.2</b>	<b>-0.7</b>
2 Pressions sans resurchauffe	<b>-2.0</b>	<b>-1.1</b>
Température Vapeur: 538°C	<b>-0.4</b>	<b>-0.2</b>
Pression HP: 124 bar	<b>+0.2</b>	<b>+0.1</b>

### **Améliorations des performances**

<b>Option</b>	<b>Application</b>	<b>Impact Maximum</b>
		<b>Puissance (%) Rendement (pts)</b>
Marche en Pointe	+ 5.0	+ 0.5
Réchauffage Gaz	Cycles 3P RS	Négligeable + 0.3
Evaporative Cooler		+ 5.2négligeable
Chiller	Ambiance chaude et sèche	+10.7 - 0.8
Injection de Vapeur	Ambiance chaude	+ 3.4 - 2.1
Injection d'eau		+ 5.9 - 2.7
Brûleurs Auxiliaires		+ 38 - 6

## 6.1 Influence du combustible sur les performances

### STAG 209E 2P

	<b>Combustible Puissance nette (%)</b>	<b>Rendement net (pts)</b>
<b>Gaz Naturel</b>	<b>Base</b>	<b>Base</b>
<b>Distillé Léger</b>	<b>-3.0</b>	<b>-9.3</b>
<b>Fuel Lourd</b>	<b>-1.1</b>	<b>-4.0</b>

### III.7 Cogénération

On appelle cogénération une centrale qui génère à la fois de l'électricité et de la chaleur, cette dernière sous forme de vapeur ou d'eau chaude.

La cogénération pure ne comporte pas de turbine à vapeur: la turbine à gaz produit l'électricité et la chaudière de récupération la vapeur ou l'eau chaude.

Dans un cycle combiné à cogénération, l'export de chaleur peut consister en une ou plusieurs extractions de vapeur, soit sur les lignes de vapeur principales, soit sur la turbine à vapeur.

Parfois aussi, le condenseur est supprimé et c'est la vapeur à l'échappement de la turbine, maintenue à une pression suffisante, qui est exportée. La turbine à vapeur est alors dite à contrepression.

Les variations importantes que peuvent subir les débits exportés et retournés conduisent souvent à ajouter une bêche alimentaire au cycle, pour amortir ces variations.

Un rendement de cogénération se définit le plus naturellement à partir de la définition:

$$\eta = \frac{\text{ce qui est utilisé}}{\text{ce qui est consommé}}$$

- **ce qui est utilisé:**

- **Puissance électrique**                    **W**
- **Puissance thermique**                **Q = S q<sub>exp</sub> (H<sub>exp</sub> - H<sub>ret</sub>)**

- **ce qui est consommé:**

- **Combustible**                                **HC**

$$\eta = \frac{W + Q}{HC} = \eta_{\text{elec}} + \frac{Q}{HC}$$

Le rendement de cogénération augmente et le rendement électrique diminue avec la puissance thermique exportée.

Une cogénération pure ou un cycle combiné avec une turbine à contrepression peuvent atteindre un rendement de cogénération de près de 90%, les autres cycles combinés à cogénération atteignent 70%.

## *Chapitre 4;*

### **Etude d'une chaudière de récupération**

#### **IV.1 Conception du HRSG :**

La conception de HRSG dépend de paramètres thermodynamiques des gaz d'échappement de la turbine à gaz en mode de cycle simple, comme la température, la pression et le débit massique des gaz pour évaluer les paramètres opératoires et de la conception géométrique de HRSG.

Dans cette recherche, les paramètres de fonctionnement de type turbine à gaz 9FB GENERAL ELECTRIC sont dépendants et énumérés ci-dessous dans le tableau 1 (échantillon à 9.8 ° C).

#### **IV.2 La configuration de la chaudière dans la centrale de Hadjret Ennous :**

Notre chaudière de récupération a étudié est horizontale a circulation naturelle elle est place directement après la turbine a gaz par l'intermédiaire d'un conne diffuseur, la calandre extérieure est une sorte de panneaux sandwich d'une épaisseur d'isolant de 1 m pour assurer le calorifugeage thermique de la chaudière.

A l'intérieur les tube de chute sont soudé au collecteur de distribution qui l'alimente en eau provenant des trois ballons, les collecteurs de retour sont à l'extérieur, des chicanes sont disposé dans différents pointe leur rôle est de crée une turbulence plus grande pour homogénéise la distribution de température et augmente le coefficient d'échange.

Le coefficient d'échange dans les chaudières de récupérations est faible donc les surfaces d'échange sont importantes, la vitesse d'écoulement des gaz est dépendue de la section de HRSG [7].

#### **IV.3 Paramètre d'entrée :**

Les différents paramètres de sortie TG sont énuméré dans le tableaux suivant :

GE 9FB	Charge de Base		Unité
	Gaz naturel	Gazole distillé	
Combustible	Gaz naturel	Gazole distillé	
PCI	46497	43800	KJ/kg
Enthalpie de combustible	311.17	/	KJ/kg
Puissance nominale du générateur	268.8	/	MW
Flux des gaz d'échappement	661.6	/	Kg/s
Température des gaz d'échappement	633	/	°C
Consommation de carburant	15.6	/	Kg/s
Inlet guide vanes	86		%

**Tableau 4.1** : Données et exploitation techniques paramètres de turbine à gaz à 9.8 ° C

### 3.1. Variables de sorties :

- Puissance thermique reçue par eau/vapeur.
- Température des fumées.
- Rendement thermique de la chaudière.

### 3.2. Hypothèses :

Quelques-unes des principales hypothèses pour dériver le modèle mathématique sont énumérées comme suit :

- Le système est supposé être à l'état d'équilibre.
- Le débit massique des gaz d'échappement, la température et la composition chimique sont obtenus lors de la simulation du cycle de gaz simple.
- Chaudière avec poste combustion.
- Désurchauffeurs entre les surchauffeurs HP et MP.
- Température de la cheminé ne doit pas être inférieure à 80 ° C tandis que la température de l'eau d'alimentation est de 30 ° C.
- La chute de pression dans le côté des gaz d'échappement ne sont pas pris en compte.
- Tubes en ligne avec ailettes solides sont considérées.
- Débit massique du fluide de travail dans ECO, EV, SH sont le même à chaque niveau de pression.

- Pression du condenseur  $P_{cond}$  = imposée.

#### IV.4 Description du procédé :

L'analyse sera effectuée pour un débit  $\dot{m}_t$  d'eau issu du condenseur et traversant en totalité l'économiseur BP, à la sortie de ce dernier, le débit sera dirigé vers l'évaporateur BP. Un débit de recirculation  $\dot{m}_{recirc}$  d'eau est soutiré à la sortie de l'économiseur BP puis réinjecter à l'amont de l'économiseur BP cette opération est réalisé pour maintenir la température des gaz d'échappement au-dessus d'une température  $T_{rejlimit} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$  pour empêcher la corrosion de métal de la chaudière causer par la condensation de l'oxyde de soufre sur les parois.

Seulement une fraction Z basse pression  $\dot{m}_{bp}$  sera évaporé à température constante de saturation  $T_{\text{éva}BP} = 142 \text{ }^\circ\text{C}$  puis surchauffé à une température  $T_{sbp} = 315 \text{ }^\circ\text{C}$  tandis qu'une fraction X haute pression et Y moyenne pression sera dirigé vers les pompes HP et MP successivement.

Le bilan massique de ces fractions permet d'écrire :

$$\dot{m}_t = \dot{m}_{hp} + \dot{m}_{mp} + \dot{m}_{bp} + \dot{m}_{recirc} + \dot{m}_{prechgaz} \quad (4-1)$$

On divise l'équation par  $\dot{m}_t$  :

$$1 = X + Y + Z + R + P \quad (4-2)$$

$$\text{Avec } X = \frac{\dot{m}_{hp}}{\dot{m}_t}, Y = \frac{\dot{m}_{mp}}{\dot{m}_t}, Z = \frac{\dot{m}_{bp}}{\dot{m}_t}, R = \frac{\dot{m}_{recirc}}{\dot{m}_t} \text{ et } P = \frac{\dot{m}_{prechgaz}}{\dot{m}_t}$$

A la sortie des pompes HP et MP un soutirage de débit  $\dot{m}_{\text{dés}hp}$  et  $\dot{m}_{\text{dés}mp}$  est faite pour alimenter les désurchauffeurs haute pression et moyenne pression.

Donc le ballon BP sert comme une bache alimentaire pour les niveaux MP et HP.

Le débit moyen pression  $\dot{m}_{mp}$  traverse un économiseur MP où il va recevoir une quantité de chaleur qui va permettre d'augmenter sa température jus 'qua a la température d'approche  $T_{\text{approch}MP}$ , ensuite l'eau s'accumule dans le ballon MP, un piquage de débit  $\dot{m}_{prechgaz}$  du ballon est faite pour préchauffe le gaz naturel qui va alimenter les chambres de combustion de la turbine à gaz, le reste de débit subi une évaporation a une température constante de saturation  $T_{\text{éva}MP} = 222 \text{ }^\circ\text{C}$  puis surchauffé a  $T_{SMP} = 315 \text{ }^\circ\text{C}$

La fraction de débit haute pression  $\dot{m}_{hp}$  traverse une série de trois économiseurs pour arriver à une température d'approche  $T_{\text{approch}HP}$  avant de rendre dans le ballon HP Le ballon HP alimente en eau l'évaporateur pour récupérer la vapeur saturée a

$$T_{\text{eva}HP} = 340 \text{ }^\circ\text{C}$$

La vapeur HP produite est surchauffée à deux reprises dans les surchauffeurs 1 et 2.

Un désurchauffeur HP est installé entre les deux surchauffeurs pour limiter la température de la vapeur à la sortie à  $T_{inMP} = 565 \text{ °C}$

Après la détente dans le corps de turbine HP, la fraction de vapeur  $\dot{m}_{hp}$  sera mélangée avec la fraction  $\dot{m}_{mp}$  qui vient de subir une surchauffe partielle dans un premier surchauffeur MP, dimensionné de telle manière que la vapeur MP ait exactement les mêmes propriétés thermodynamiques que celle à la sortie de la turbine HP, on notera  $T_{mix}$  la température résultante du mélange.

À l'issue de cette opération, une fraction (X+Y) va subir une resurchauffe dans un premier resurchauffeur MP, suivie d'une désurchauffe en injectant de l'eau puis une deuxième resurchauffe pour atteindre la température maximum  $T_{inMP} = 565 \text{ °C}$

La vapeur resurchauffée subit une détente complète à travers le corps de turbine MP.

Le débit  $\dot{m}_{bp}$  ayant les mêmes propriétés thermodynamiques que la vapeur détendue dans le corps BP libère son énergie en se détendant dans le corps BP

#### **IV.5 Equilibre d'énergie :**

La première étape pour modéliser la chaudière de récupération consiste à équilibrer la masse et l'énergie entre les courants chaud et froid (côté gaz et du côté eau / vapeur) sur différents échangeurs de chaleur où les paramètres conçus (le débit, la température, la pression de vapeur surchauffée et la température de sortie des gaz d'échappement) sont obtenus des mesures réelles. Le bilan énergétique peut être exprimé par les équations suivantes :

##### **5.1. Bilan énergétique de la chaudière de récupération :**

$$Q_g = [Q_{schp1} + Q_{schp2} + Q_{evhp} + Q_{echp1} + Q_{echp2} + Q_{echp3}] + [Q_{scmp} + Q_{evmp} + Q_{ecmp} + Q_{rsmp1} + Q_{rsmp2}] + [Q_{scbp} + Q_{evbp} + Q_{ecbp}] + Q_{prehgaz} + Q_{pertchemini} \quad (4-3)$$

Débit des gaz d'échappement :

$$\dot{m}_g = 649,677 \text{ (Kg/s)}$$

Chaleur spécifique moyenne des gaz d'échappement :

$$Cp_g = 1,18 \frac{kJ}{kg * C}$$

Température des gaz d'échappement la sortie de la chaudière est donnée :

$$t_{15} = 85,4 \text{ °C}$$

Débit de vapeur corps basse pression :

$$\dot{m}_{bp} = 10,2 \text{ (Kg/s)}$$

Débit de vapeur corps moyenne pression :

$$\dot{m}_{mp} = 11,35 \text{ (Kg/s)}$$

Débit de vapeur corps haut pression :

$$\dot{m}_{hp} = 82,411 \text{ (Kg/s)}$$

Débit d'eau de recirculation :

$$\dot{m}_{recirc} = 53,21 \text{ (Kg/s)}$$

Débit d'eau de désurchauffeur haute pression :

$$\dot{m}_{deshp} = 0,388 \text{ (Kg/s)}$$

Débit d'eau de désurchauffeur moyenne pression :

$$\dot{m}_{desmp} = 0,2694 \text{ (Kg/s)}$$

Débit d'eau pour le préchauffage de gaz naturel :

$$\dot{m}_{prechgaz} = 7,2 \text{ (Kg/s)}$$

Enthalpie de l'eau à l'entrée de l'économiseur BP :

$$h_{1b} = 298,8 \text{ (KJ/kg)}$$

Enthalpie de l'eau à la sortie de l'économiseur BP :

$$h_{2b} = 587,7 \text{ (KJ/kg)}$$

Débit total de l'eau :

$$\dot{m}_t = \dot{m}_{hp} + \dot{m}_{mp} + \dot{m}_{gbp} + \dot{m}_{recirc} + \dot{m}_{prechgaz} \quad (4 - 4)$$

## 5.2. Bilan énergétique de l'économiseur BP :

$$\dot{m}_g \cdot cp_g \cdot (t_{14} - t_{15}) = \dot{m}_t \cdot (h_{2b} - h_{1b}) \quad (4 - 5)$$

$t_{14}$  : Température des gaz d'échappement à l'entrée de l'évaporateur BP (°C).

$t_{15}$  : Température des gaz d'échappement à la sortie de l'économiseur BP (°C).

$h_{2b}$  : L'enthalpie de l'eau à la sortie de l'économiseur BP (kJ/kg).

$h_{1b}$  : L'enthalpie de l'eau à l'entrée de l'économiseur BP (kJ/kg).

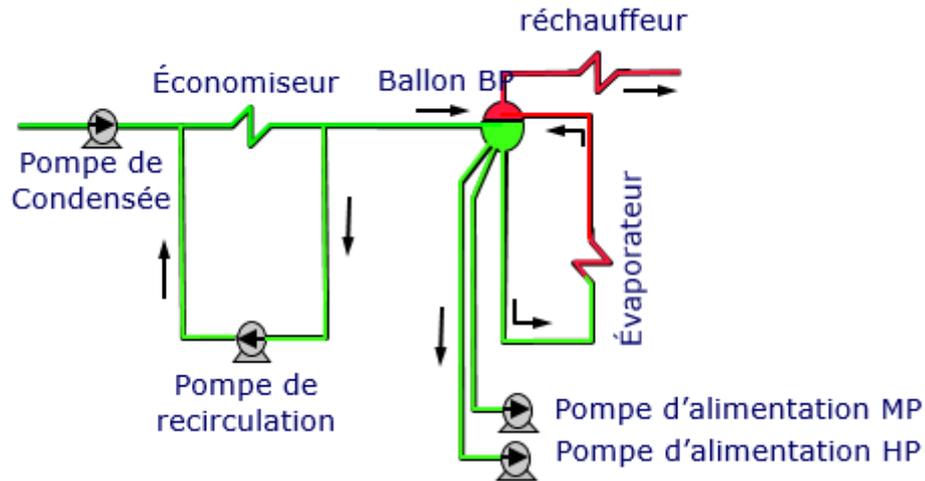


Figure 4.1 : boucle basse pression

### 5.3. Bilan énergétique de l'évaporateur BP :

$$h_{3b} = 630,3 \text{ (KJ/kg)}$$

$$\dot{m}_g \cdot c_{p_g} \cdot (t_{13} - t_{14}) = (\dot{m}_t - \dot{m}_{recirc}) \cdot (h_{3b} - h_{2b}) + \dot{m}_{bp} \cdot (h_{3b_{vapeur}} - h_{3b}) \quad (4 - 6)$$

$t_{13}$  : Température des gaz d'échappement à l'entrée de l'économiseur HP1 (°C).

$h_{3b_{vapeur}}$  : L'enthalpie de vapeur à la sortie de l'évaporateur BP (kJ/kg).

$h_{3b}$  : L'enthalpie de l'eau à la sortie de l'évaporateur BP (kJ/kg).

### 5.4. Bilan énergétique de l'économiseur HP1 :

$$h_{pomp_{hp}} = 661,8 \text{ (Kj/kg)}$$

$$\dot{m}_g \cdot c_{p_g} \cdot (t_{12} - t_{13}) = (\dot{m}_{hp} - \dot{m}_{des_{hp}}) \cdot (h_{4h} - h_{pomp_{hp}}) \quad (4 - 7)$$

$t_{12}$  : Température des gaz d'échappement à l'entrée de l'économiseur MP (°C).

$h_{4h}$  : L'enthalpie de l'eau à la sortie de l'économiseur HP1 (kJ/kg).

$h_{pomp_{hp}}$  : L'enthalpie de l'eau à la sortie de la pompe HP (kJ/kg).

### 5.5. Bilan énergétique de l'économiseur MP :

$$h_{pomp_{mp}} = 637,5 \text{ (KJ/kg)}$$

$$h_{5m} = 933,4 \text{ (kJ/kg)}$$

$$\dot{m}_g \cdot c_{p_g} \cdot (t_{11} - t_{12}) = (\dot{m}_{mp} + \dot{m}_{prech_{gaz}}) \cdot (h_{5m} - h_{pomp_{mp}}) \quad (4 - 8)$$

$$t_{11} = 243^\circ\text{C}$$

$t_{11}$  : Température des gaz d'échappement à l'entrée de l'évaporateur MP (°C).

$h_{5m}$  ; L'enthalpie de l'eau à la sortie de l'économiseur MP (kJ/kg).

$h_{pomp_{mp}}$  : L'enthalpie de l'eau à la sortie de la pompe MP (kJ/kg).

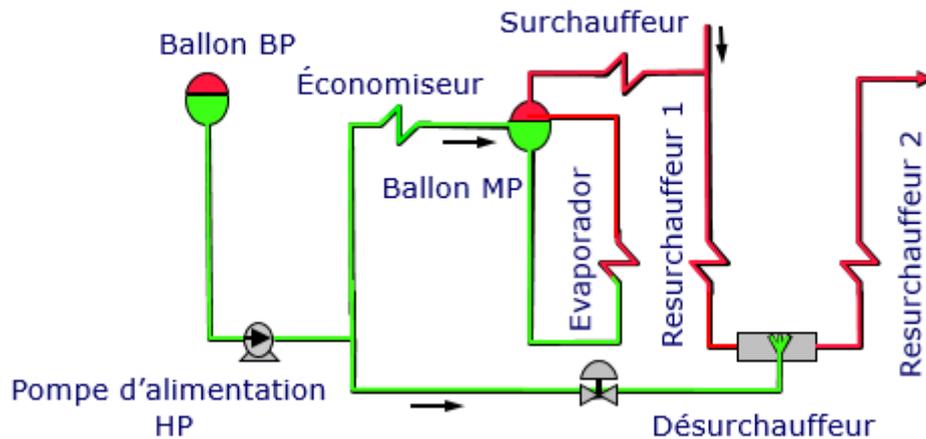


Figure 4.2 : boucle moyen pression

### 5.6. Bilan énergétique de l'évaporateur MP :

$$P_{vap_{mp}} = 24.5 \text{ bars}$$

$$T_{vap_{mp}} = 223,5^{\circ}\text{C}$$

$$\dot{m}_g \cdot c_{p_g} \cdot (t_{10} - t_{11}) = (\dot{m}_{mp} - \dot{m}_{des_{mp}}) \cdot (h_{6m} - h_{5m}) \quad (4 - 9)$$

$t_{10}$  : Température des gaz d'échappement à l'entrée de l'économiseur HP2 ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$h_{6m}$  : L'enthalpie de l'eau à la sortie de l'évaporateur MP (kJ/kg).

$P_{vap_{mp}}$  : La pression de vaporisation dans le ballon MP (bars).

$T_{vap_{mp}}$  : La température de vaporisation dans le ballon MP ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### 5.7. Bilan énergétique de l'économiseur HP2 :

$$\dot{m}_g \cdot c_{p_g} \cdot (t_9 - t_{10}) = (\dot{m}_{hp} - \dot{m}_{des_{hp}}) \cdot (h_{7h} - h_{4h}) \quad (4 - 10)$$

$t_9$  : Température des gaz d'échappement à l'entrée de la surchauffeur BP ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$h_{7h}$  : L'enthalpie de l'eau à la sortie de l'économiseur HP2 (kJ/kg).

### 5.8. Bilan énergétique de surchauffeur BP :

$$h_{8b} = 3088 \text{ (KJ/kg)}$$

$$\dot{m}_g \cdot c_{p_g} \cdot (t_8 - t_9) = \dot{m}_{bp} \cdot (h_{8b} - h_{3b}) \quad (4 - 11)$$

$t_8$  : Température des gaz d'échappement à la sortie de la surchauffeur MP ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$h_{8b}$  : L'enthalpie de la vapeur à la sortie de la surchauffeur BP (kJ/kg).

### 5.9. Bilan énergétique de surchauffeur MP :

$$h_{9m} = 3014,5 \text{ (kj/kg)}$$

$$\dot{m}_g \cdot cp_g \cdot (t_7 - t_8) = (\dot{m}_{mp} - \dot{m}_{des_{mp}}) \cdot (h_{9m} - h_{6m}) \quad (4 - 12)$$

$t_7$  : Température des gaz d'échappement à l'entrée de l'économiseur HP3 (°C).

$h_{9m}$  : L'enthalpie de la vapeur à la sortie de la surchauffeur MP (kj/kg).

### 5.10. Bilan énergétique de l'économiseur HP 3 :

$$\dot{m}_g \cdot cp_g \cdot (t_6 - t_7) = (\dot{m}_{hp} - \dot{m}_{des_{hp}}) \cdot (h_{10h} - h_{7h}) \quad (4 - 13)$$

$t_6$  : Température des gaz d'échappement à l'entrée de l'évaporateur HP (°C).

$h_{10h}$  : L'enthalpie de la vapeur à la sortie de l'économiseur HP3 (kj/kg).

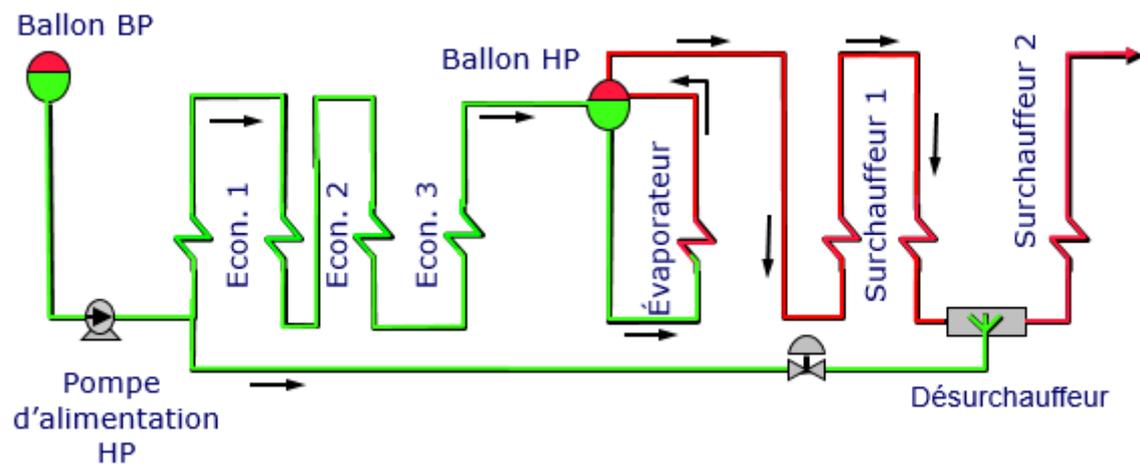


Figure 4.3 : circuit haute pression

### 5.11. Bilan énergétique de l'évaporateur HP :

$$P_{vap_{hp}} = 124,5 \text{ bars}$$

$$T_{vap_{hp}} = 332^\circ\text{C}$$

$$\dot{m}_g \cdot cp_g \cdot (t_5 - t_6) = (\dot{m}_{hp} - \dot{m}_{des_{hp}}) \cdot (h_{11h} - h_{10h}) \quad (4 - 14)$$

$P_{vap_{hp}}$  : La pression de vaporisation dans le ballon HP (bars).

$T_{vap_{hp}}$  : La température de vaporisation dans le ballon HP (°C).

$t_5$  : Température des gaz d'échappement à l'entrée de la surchauffeur HP1 (°C).

$h_{11h}$  : L'enthalpie de la vapeur à la sortie de l'évaporateur HP (kj/kg).

### 5.12. Bilan énergétique de surchauffeur HP1 :

$$\dot{m}_g \cdot cp_g \cdot (t_4 - t_5) = (\dot{m}_{hp} - \dot{m}_{des_{hp}}) \cdot (h_{12h} - h_{11h}) \quad (4 - 15)$$

$t_4$  : Température des gaz d'échappement à l'entrée de la resurchauffeur MP1 (°C).

$h_{12h}$  : L'enthalpie de la vapeur à la sortie de la surchauffeur HP1 (kJ/kg).

**5.13. Bilan énergétique de resurchauffeur MP1 :**

$$h_{mix_m} = 3103,3 \text{ (kJ/kg)}$$

$$\dot{m}_g \cdot c p_g \cdot (t_3 - t_4) = (\dot{m}_{mp} - \dot{m}_{des_{mp}} + \dot{m}_{hp}) \cdot (h_{15m} - h_{mix_m}) \quad (4 - 16)$$

$t_3$  : Température des gaz d'échappement à l'entrée du resurchauffeur MP2 (°C).

$h_{15m}$  : L'enthalpie de la vapeur à la sortie du désurchauffeur MP (kJ/kg).

$h_{mix_m}$  : L'enthalpie de la vapeur à l'entrée du resurchauffeur MP1 (kJ/kg).

**5.14. Bilan énergétique de désurchauffeur MP :**

$$\dot{m}_{des_{mp}} \cdot h_{pomp_{mp}} + (\dot{m}_{mp} - \dot{m}_{des_{mp}} + \dot{m}_{hp}) \cdot h_{15m} = (\dot{m}_{mp} + \dot{m}_{hp}) \cdot h_{16m} \quad (4 - 17)$$

$h_{16m}$  : L'enthalpie de la vapeur à la sortie du resurchauffeur MP2 (kJ/kg).

**5.15. Bilan énergétique de resurchauffeur MP2 :**

$$h_{17m} = 3610,3 \text{ (kJ/kg)}$$

$$\dot{m}_g \cdot c p_g \cdot (t_2 - t_3) = (\dot{m}_{mp} + \dot{m}_{hp}) \cdot (h_{17m} - h_{16m}) \quad (4 - 18)$$

$t_2$  : Température des gaz d'échappement à l'entrée de la surchauffeur HP2 (°C).

$h_{17m}$  : L'enthalpie de la vapeur à la sortie de la surchauffeur HP2 (kJ/kg).

**5.16. Bilan énergétique de désurchauffeur HP :**

$$\dot{m}_{des_{hp}} \cdot h_{pomp_{hp}} + (\dot{m}_{hp} - \dot{m}_{des_{hp}}) \cdot h_{12h} = \dot{m}_{hp} \cdot h_{13h} \quad (4 - 19)$$

**5.17. Bilan énergétique de surchauffeur HP2 :**

$$\dot{m}_g \cdot c p_g \cdot (t_1 - t_2) = \dot{m}_{hp} \cdot (h_{14h} - h_{13h}) \quad (4 - 20)$$

$$h_{14h} = 3508,1 \text{ (KJ/kg)}$$

$$t_1 = 631,8^\circ\text{C}$$

$t_1$  : Température des gaz d'échappement à l'entrée de la surchauffeur HP2 (°C) (sortie de la TAG).

$h_{14h}$  : L'enthalpie de la vapeur à la sortie du désurchauffeur HP (kJ/kg).

$h_{13h}$  : L'enthalpie de la vapeur à la sortie de la surchauffeur HP2 (kJ/kg).

**IV.6 Distribution de la température à l'intérieure de la chaudière de récupération :**

	Eau-vapeur		Gaz d'échappement	
	T entré °C	T sortie °C	T entré °C	T sortie °C
Economiseur BP	71	139,5	146,9	85
Evaporateur BP	139,5	142	176,7	146,9
Economiseur HP1	154,6	229,4	246	180
Economiseur MP	150	217	237	180
Evaporateur MP	217	222	278	237
Economiseur HP2	229,4	270	245,9	279,9
Surchauffeur BP	142	310,8	276,3	243,6
Surchauffeur MP	222	302	306,8	276,3
Economiseur HP3	270	320,6	336,4	306,8
Evaporateur HP	320,6	327,5	471,3	336,4
Surchauffeur HP1	333,5	477,5	532,5	471,3
Resurchauffeur MP1	320,9	530	584,6	532,5
Désurchauffeur HP	482,	477,5	/	/
Désurchauffeur MP	530	526,1	/	/
Resurchauffeur MP2	526,1	565,8	595,6	584,6
Surchauffeur HP2	477,5	562,2	631,8	595,6

**Tableau 4.2** : température sans post combustion

#### **IV.7 Calcul de l'approche et de pincement :**

Pour éviter la vaporisation d'eau dans la zone finale de l'économiseur, la température de l'eau à la sortie de l'économiseur, il faut qu'elle soit au-dessous de la température de saturation correspondante à la pression de sortie de l'économiseur.

Cet écart de température est connu dans la littérature sous le nom de point d'approche "approach point". Prenant en considération que cet écart de température est un paramètre établi par le fabricant, celui-ci est imposé par l'utilisateur.

Le pincement "pinch point" représente l'écart minimal de température dans la chaudière de récupération entre les deux fluides (gaz d'échappement et eau/vapeur) [6].

### 7.1. Niveau basse pression :

#### Approche BP :

$$\Delta T_{apbp} = T_{satbp} - T_{ecobp} \quad (4 - 21)$$

$$\Delta T_{apbp} = 142 - 139,5$$

$$\Delta T_{apbp} = 2,5 \text{ °C}$$

#### Pincement BP :

$$\Delta T_{pbp} = T_{14} - T_{satbp} \quad (4 - 22)$$

$$\Delta T_{pbp} = 146,9 - 142$$

$$\Delta T_{pbp} = 4,9 \text{ °C}$$

### 7.2. Niveau moyen pression :

#### Approche MP :

$$\Delta T_{apmp} = T_{satmp} - T_{ecommp} \quad (4 - 23)$$

$$\Delta T_{apmp} = 222 - 217$$

$$\Delta T_{apmp} = 5 \text{ °C}$$

#### Pincement MP :

$$\Delta T_{pmp} = T_{11} - T_{satmp} \quad (4 - 24)$$

$$\Delta T_{pmp} = 237 - 222$$

$$\Delta T_{pmp} = 15 \text{ °C}$$

### 7.3. Niveau haute pression :

#### Approche HP :

$$\Delta T_{aphp} = T_{sathp} - T_{ecohp3} \quad (4 - 25)$$

$$\Delta T_{aphp} = 327,5 - 320,6$$

$$\Delta T_{ap\text{hp}} = 6,9^{\circ}\text{C}$$

**Pincement HP :**

$$\Delta T_{p\text{hp}} = T_6 - T_{sathp} \quad (4 - 26)$$

$$\Delta T_{p\text{hp}} = 339,3 - 327,5$$

$$\Delta T_{p\text{hp}} = 11,8^{\circ}\text{C}$$

#### 7.4. Calcul des puissances thermiques transféré :

Puissance transférée dans le niveau basse pression :

$$P_{BP} = P_{ecbp} + P_{evbp} + P_{scbp} \quad (4 - 27)$$

Puissance transférée dans l'économiseur :

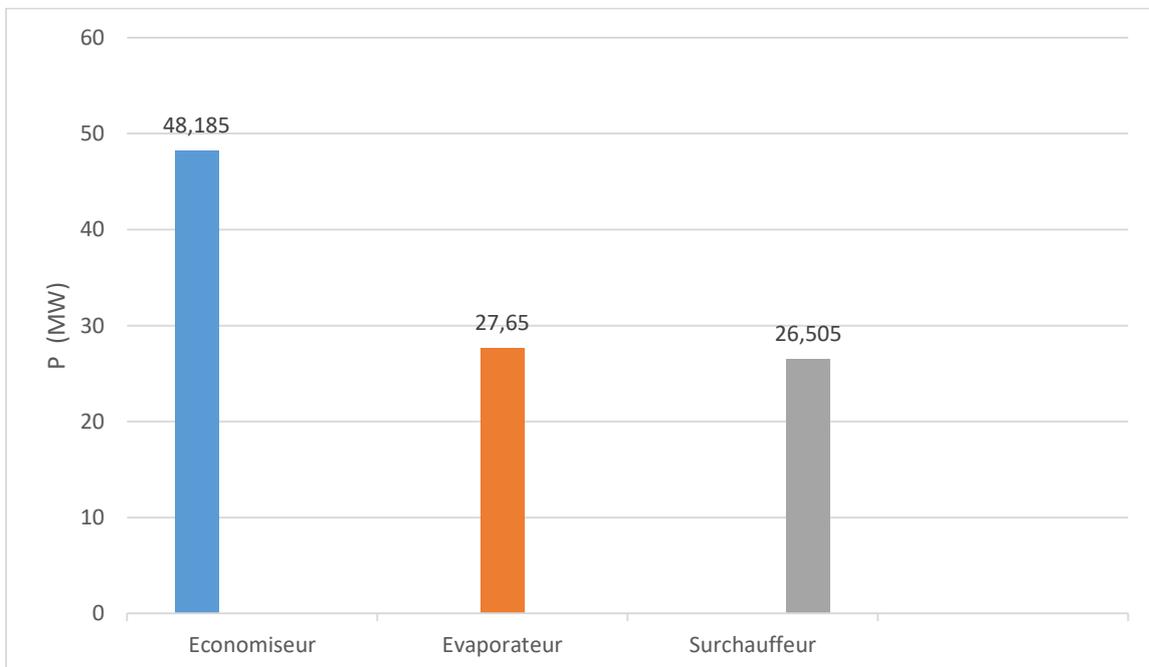
$$P_{ecbp} = \dot{m}_t * (h_{1b} - h_{2b}) \quad (4 - 28)$$

Puissance transférée dans l'évaporateur :

$$P_{evbp} = (\dot{m}_t - \dot{m}_{recirc}) * (h_{3b} - h_{2b}) + \dot{m}_{bp} * (h_{3b\text{vapeur}} - h_{3b}) \quad (4 - 29)$$

Puissance transférée dans la surchauffeur :

$$P_{scbp} = \dot{m}_{bp} * (h_{8b} - h_{3b\text{vapeur}}) \quad (4 - 30)$$



**Figure 4.4 :** puissance transférée dans la boucle BP

Puissance transférée dans le niveau moyen pression :

$$P_{MP} = P_{ecmp} + P_{evmp} + P_{scmp} + P_{rescmp1} + P_{rescmp2} \quad (4 - 31)$$

Puissance transférée dans l'économiseur :

$$P_{ecmp} = (\dot{m}_{mp} + \dot{m}_{prechgaz}) * (h_{5m} - h_{pompmp}) (4 - 32)$$

Puissance transférée dans l'évaporateur :

$$P_{evmp} = \dot{m}_{mp} * (h_{6m} - h_{5m}) (4 - 33)$$

Puissance transférée dans la surchauffeur :

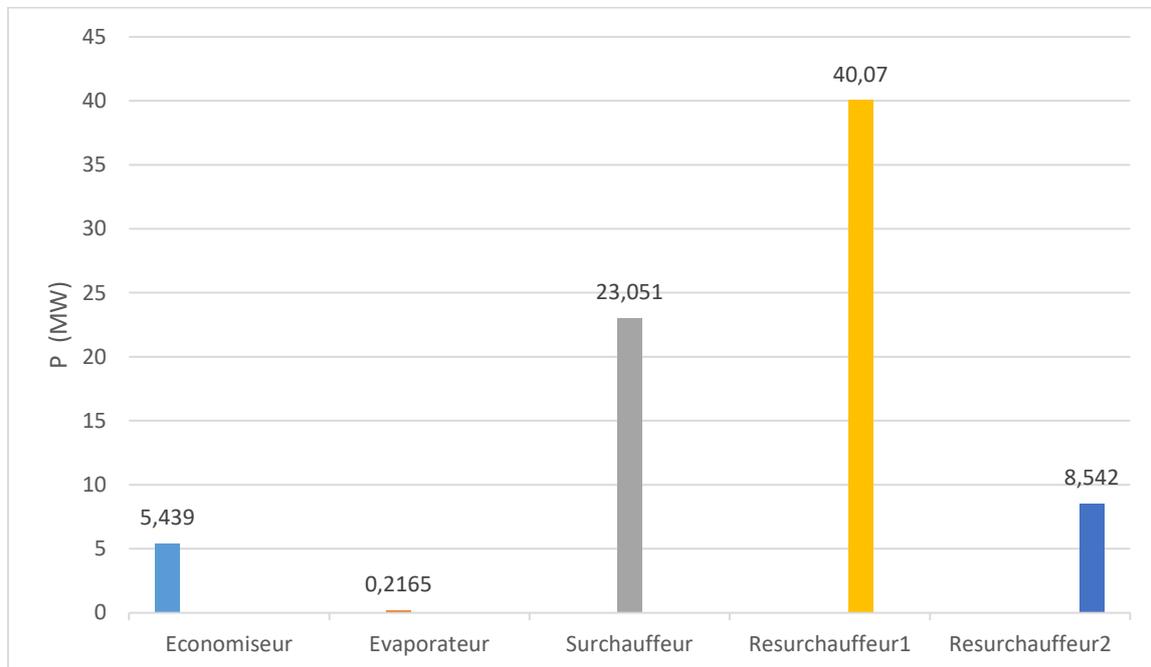
$$P_{scmp} = \dot{m}_{mp} * (h_{9m} - h_{6m}) (4 - 34)$$

Puissance transférée dans le resurchauffeur 1 :

$$P_{rescmp1} = (\dot{m}_{mp} + \dot{m}_{hp}) * (h_{15m} - h_{mix_m}) (4 - 35)$$

Puissance transférée dans le resurchauffeur 2 :

$$P_{rescmp2} = (\dot{m}_{mp} + \dot{m}_{hp}) * (h_{17m} - h_{16m}) (4 - 36)$$



**Figure 4.5** : puissance transférée dans la boucle MP

Puissance transférée dans le niveau haute pression :

$$P_{HP} = P_{echp1} + P_{echp2} + P_{echp3} + P_{evhp} + P_{schp1} + P_{schp2} (4 - 37)$$

Puissance transférée dans l'économiseur 1 :

$$P_{echp1} = (\dot{m}_{hp} - \dot{m}_{des_{hp}}) * (h_{4h} - h_{pomp_{hp}}) (4 - 38)$$

Puissance transférée dans l'économiseur 2 :

$$P_{echp2} = (\dot{m}_{hp} - \dot{m}_{des_{hp}}) * (h_{7h} - h_{4h}) (4 - 39)$$

Puissance transférée dans l'économiseur 3 :

$$P_{echp3} = (\dot{m}_{hp} - \dot{m}_{des_{hp}}) * (h_{10h} - h_{7h}) (4 - 40)$$

Puissance transférée dans l'évaporateur :

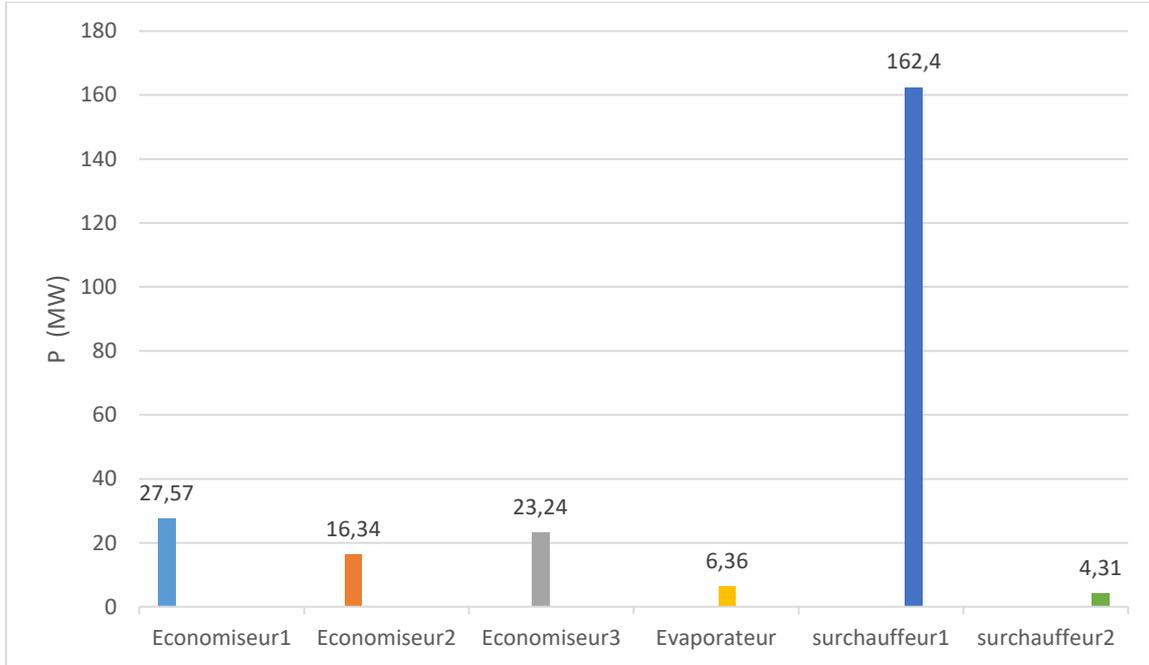
$$P_{evhp} = (\dot{m}_{hp} - \dot{m}_{des_{hp}}) * (h_{11h} - h_{10h})(4 - 41)$$

Puissance transférée dans le surchauffeur 1 :

$$P_{schp1} = (\dot{m}_{hp} - \dot{m}_{des_{hp}}) * (h_{12h} - h_{11h})(4 - 42)$$

Puissance transférée dans le surchauffeur 2 :

$$P_{schp2} = \dot{m}_{hp} * (h_{14h} - h_{13h})(4 - 43)$$



**Figure 4.6 :** puissance transférée dans la boucle HP

Et l'efficacité du HRSG est donnée par :

$$\varepsilon = \frac{T_1 - T_{rej}}{T_1 - T_{ambiant}} = \frac{633 - 85}{633 - 15} = 0,88 \quad (4.44)$$

Puissance produite par la turbine à vapeur dans ces conditions :

$$P_{hp} = \dot{m}_{hp} * W_{Thp} + (\dot{m}_{hp} + \dot{m}_{mp}) * W_{Tmp} + (\dot{m}_{hp} + \dot{m}_{mp} + \dot{m}_{bp}) * W_{Tbp}$$

$$P_{hp} = 149,5 \text{ MW}$$

Rendement de cycle vapeur  $\eta_v = 0,4326$

Rendement de récupération :  $\eta_r = \eta_v * \varepsilon = 0,4364 * 0,88$

$$\eta_r = 0,384$$

#### **IV.8 Analyse de la chaudière avec combustion secondaire :**

La combustion secondaire est une méthode pour améliorer le rendement de puissance de la turbine à vapeur. Elle est en marche seulement en deux cas.

1-La turbine à gaz ne dégage pas suffisamment de débit d'échappement est la température est légèrement basse

2-La déménage électrique est maximum ; la turbine à gaz arrive à son débit max est ne pourra plus augmente sa puissance donc la solution est d'augmenter la puissance de la turbine à vapeur

### **8.1. Description de procédé :**

La combustion secondaire est un apport calorifique consiste a brulé un débit de gaz avec l'oxygène restent dans l'échappement vu que la combustion dans la turbine à gaz ce fait avec excès d'air cette réaction aura lieu entre les deux surchauffeur HP et resurchauffeur MP Cette combustion permet ramener les gaz à une température de  $t_3 = 608 \text{ }^\circ\text{C}$

Vue que les échangeurs HP (SC, EVA, ECO) sont les premier a entré en contact avec les gaz chauds, le cycle HP sera le plus affecté par la poste combustion :

- La température a la sortie de surchauffeur HP augmente mais cette augmentation est régulée par le désurchauffeur HP
- Le débit d'eau évaporé s'accroît dans l'évaporateur HP et par la suite dans les deux surchauffeurs HP
- Dans une tuyauterie en boucle ferme jusqu'à la turbine à vapeur l'accroissement de débit de vapeur engendre une augmentation de la pression HP
- L'accroissement de débit HP entraine une augmentation de débit MP qui traverse la turbine MP puisque les débits HP et MP sont additionne est resurchauffe et aussi pour la turbine BP

Le cycle moyen pression et basse pression sont faiblement affecter par la poste combustion vue leur disposition qui les positionne dans la partie moyenne et basse température.

### **8.2. Equilibre d'énergie pour la chaudière de récupération avec poste combustion :**

#### **8.2.1. Hypothèse :**

- Régimes permanant
- Distribution homogène de la température dans le foyer de combustion secondaire
- Débit massique du fluide de travail dans ECO, EV, SH sont le même à chaque niveau de pression.
- Variation de la chaleur spécifique des gaz d'échappement après combustion auxiliaire négligeable.

Calcule thermodynamique

- En amont des bruleurs auxiliaires

$$Q_g = [Q_{schp2}] + [Q_{rsmp2}] \quad (4,47)$$

➤ En aval des bruleurs auxiliaires

$$Q_{gPC} = [Q_{schp1} + Q_{evhp} + Q_{echp1} + Q_{echp2} + Q_{echp3}] \\ + [Q_{scmp} + Q_{evmp} + Q_{ecmp} + Q_{rsmp1} +] + [Q_{scbp} + Q_{evbp} + Q_{ecbp}] \\ + Q_{prechgaz} + Q_{pertchemini}(4,48)$$

Dans les équations(4,5) jusque (4,16) de système sans poste CP ustion on va ajouter le débit de gaz naturel brulé le reste des équations de bilan reste inchangé.

Donnée de l'analyse

Le débit de gaz brulé  $m_{gPC} = 2420 \frac{Nm^3}{h} = 0,6 \frac{kg}{s}$

Débit des gaz d'échappement :

$$\dot{m}_g = 649,677 \text{ (Kg/s)}$$

Chaleur spécifique moyenne des gaz d'échappement :

$$Cp_g = 1,18 \frac{kJ}{kg * C}$$

Température des gaz d'échappement à la sortie de la chaudière est donnée :

$$t_{15} = 87^{\circ}C$$

Débit de vapeur corps basse pression :

$$\dot{m}_{bp} = 10,9 \text{ (Kg/s)}$$

Débit de vapeur corps moyenne pression :

$$\dot{m}_{mp} = 12,134 \text{ (Kg/s)}$$

Débit de vapeur corps haut pression :

$$\dot{m}_{hp} = 89,6 \text{ (Kg/s)}$$

Débit d'eau de recirculation :

$$\dot{m}_{recirc} = 58,21 \text{ (Kg/s)}$$

Débit d'eau de désurchauffeur haute pression :

$$\dot{m}_{deshp} = 0,9 \text{ (Kg/s)}$$

Débit d'eau de désurchauffeur moyenne pression :

$$\dot{m}_{desmp} = 0,4 \text{ (Kg/s)}$$

Débit d'eau pour le préchauffage de gaz naturel :

$$\dot{m}_{prechgaz} = 7,1 \text{ (Kg/s)}$$

Pression de la vapeur HP

$$P_{hp} = 138 \text{ bar}$$

**8.3. Distribution de la température à l'intérieure de la chaudière de récupération avec combustion auxiliaire :**

	Eau-vapeur		Gaz d'échappement	
	T entré °C	T sortie °C	T entré °C	T sortie °C
Economiseur BP	71	139,5	146,9	85
Evaporateur BP	139,5	142	176,7	146,9
Economiseur HP1	154,6	229,4	246	180
Economiseur MP	150	217	237	180
Evaporateur MP	217	222	278	237
Economiseur HP2	229,4	270	245,9	279,9
Surchauffeur BP	142	310,8	279,9	245,9
Surchauffeur MP	222	302	309,4	279,9
Economiseur HP3	270	320,6	339,3	309,4
Evaporateur HP	320,6	327,5	347,4	339,3
Surchauffeur HP1	327,5	547,6	555,7	347,4
Resurchauffeur MP1	340,9	530	607,9	555,7
Désurchauffeur HP	547,6	542,6	/	/
Désurchauffeur MP	530	526,1	/	/
Resurchauffeur MP2	526,1	565,8	626,3	607,9
Surchauffeur HP2	542,6	562,2	631,8	626,3

**Tableau 4.3 : température avec combustion auxiliaire**

Et l'efficacité du HRSG est donnée par :

$$\varepsilon = \frac{T_1 - T_{rej}}{T_1 - T_{ambiant}} = \frac{633 - 85}{633 - 15} = 0,886 \quad (4.44)$$

Puissance produite par la turbine à vapeur dans ces conditions :

$$P_{hp} = m_{hp} * W_{Thp} + (m_{hp} + m_{mp}) * W_{Tmp} + (m_{hp} + m_{mp} + m_{bp}) * W_{Tbp}$$

$$P_{hp} = 156,9 \text{ MW}$$

Rendement de cycle vapeur  $\eta_v = 0,4326$

Rendement de cycle vapeur  $\eta_{cc} = 0,572$

Rendement de récupération :  $\eta_r = \eta_v * \varepsilon = 0,4326 * 0,88$

$$\eta_r = 0,3806$$

## **Conclusion générale**

Dans la présente étude, nous avons tenté de comprendre comment le fonctionnement des chaudières de récupération est affecté par le choix des paramètres déterminants tels que notamment les caractéristiques de la vapeur, la configuration des échanges de chaleur entre les gaz et la vapeur au sein de la Chaudière.

Dans de grands cycles combinés modernes, nous employons généralement 3 niveaux de pression, plus un resurchauffeur. Le resurchauffeur est un surchauffeur qui réchauffent la vapeur surchauffée de la sortie de turbine à vapeur HP et l'envoie de nouveau à admission de turbine à vapeur d'IP. Avec ce genre d'arrangement, l'efficacité globale du CC peut atteindre 58%.

Le choix du nombre de niveaux de pression est une conséquence directe de la turbine à combustion qui a été retenue en amont

Dans le HRSG la température des fumées va imposer la pression maximale d'opération (pendant que de la pression et la température de saturation sont liées). Elle impose également une disposition des différents échangeurs de chaleur, du plus chaud(surchauffeur) au plus froid (économiseur).

La combustion secondaire est une technique utilisée pour augmenter la puissance de cycle combine avec une légère chute de rendement thermique de l'installation, mais cette technique est limitée par plusieurs contraintes tel que la pression d'admission, et excès d'air restent dans les fumées.

## Reference bibliography

- [1] General Electric Company 2007
- [2] Transfer de energies MR. Guergadj Mohamed
- [3] Bhargava R. K., Bianchi. M., De Pascale A., Negri di Montenegro. G., Peretto. A., "Gas Turbine Based Power Cycles - A State-of-the-Art Review " International Conference on Power Engineering-2007, October 23-27, 2007, Hangzhou, China
- [4] Paren J., Parietti c., Centrales à cycles combinés VEGA 109F 3 pressions resurchauffe, Revue Technique GEC ALSTHOM, 4, (1991), 15-26
- [5] Programme Indicatif des Besoins en Moyens de Production d'Electricité 2012 – 2021 N° janvier 2013
- [6] Mahmoud Nadir, Adel Ghenaiet Thermodynamic optimization of several (heat recovery steam generator) HRSG configurations for a range of exhaust gas temperatures
- [7] Abid-Al-Rahman.H.AL-Hobo, Maher .Saab. Salamah , Design Of Dual Pressure Heat Recovery Steam Generator For Combined Power Plants, Iraq 2005
- [8] : 'Electricité et Gaz', consulté le 15/06/2018, sur le site : <http://www.energy.gov.dz/francais/uploads/2016/Energie/electricite-gaz-maj.pdf>
- [9] 'Centrales électriques diesel', consulté le 15/06/2018, sur le site : <http://www.sauercompressors.com/fr/industrie/production%20denergie/centralesselectriques-diesel/>
- [10] 'Production électrique par des centrales hydroélectriques en Algérie', consulté le 15/06/2018, sur le site : <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=378>
- [10] 'Production électrique par des centrales hydroélectriques en Algérie', consulté le 15/06/2018, sur le site : <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=378>
- [11] 'Avantages et inconvénients des centrales à cycle combiné', consulté le 15/06/2018, sur le site : <https://www.fournisseurs-electricite.com/infos-pratiques-sur-les-fournisseursdelectricite/les-centrales-electriques/cycle-combine>
- [12] 'Les chiffres clés 2017 fournis par SONELGAZ ', consulté le 15/06/2018, sur le site : <http://www.sonelgaz.dz/?page=article&ida=664>
- [13] Page officielle du ministère français de la santé sur le monoxyde de carbone, 05/06/2018, consulté le 10/09/2018, sur le site : <http://energie.edf.com/thermique/une-energie-pour-demain/les-cycles-combines-gaz/quyestce-quyun-cycle-combine-gaz-47869.html>
- [14] 'Centrale thermique turbine Vapeur', consulté le 15/06/2018, sur le site : [http://www.steg.com.tn/fr/institutionnel/tech\\_vapeur.html](http://www.steg.com.tn/fr/institutionnel/tech_vapeur.html)

[15] 'centrales hydroélectriques' consulté le 15/06/2018, sur le site  
:https://www.nbpower.com/fr/about-us/learning/learn-about-electricity/hydro/