

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche**

**Scientifique**

**Université M'Hamed Bougara - Boumerdès**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie des Procédés**



## **Mémoire**

En vue de l'obtention du diplôme de Master En Génie des procédés

Option : Génie de L'environnement

## **THEME**

**Contribution à l'étude des paramètres physico-chimiques et de la combustion influençant la qualité et la quantité de la vapeur produite dans la centrale de RAS DJINET**

### **Présenté par :**

- Zenoud Selma
- Haouas Hakima

### **Dirigé par :**

- Mme Ben abd allah Amina
- Mr.Méchakou Karim

**Mémoire soutenu le : 21/09/ 2022 devant le jury composé de :**

Mr. Aksas Hamouche	MCA	UMBB	president
Mme. Larid Rouza	MAA	UMBB	Examinatrice
Mr. Kouini Benalia	MCA	UMBB	Examineur

**Année universitaire : 2021/2022**

## Résumé

L'objectif de la recherche est d'étudier les différentes étapes du traitement de l'eau de mer à la centrale thermique de Cap-Djinet, et d'obtenir une bonne quantité de vapeur en utilisant une combustion complète de l'eau, ce qui nous permet de faire fonctionner les turbines, qui produisent de l'électricité.

La phase principale de traitement de l'eau est la chloration suivie de la filtration, du dessalement et enfin de l'élimination des métaux.

Des analyses physico-chimiques sont effectuées sur différentes quantités d'eau produites (pH, conductivité, etc.)

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que la quantité et la qualité du procédé à la vapeur sont bonnes et que nous obtenons des résultats satisfaisants.

Mots clés : L'eau de mer, Dessalement, Evaporation, Combustion. Energie électrique.

## ملخص

الهدف من البحث هو دراسة المراحل المختلفة من معالجة مياه البحر في محطة رأس جنات لتوليد الطاقة الحرارية والحصول على كمية جيدة من البخار باستخدام احتراق كامل للمياه مما يسمح لنا بتشغيل التوربينات التي تنتج الكهرباء. المرحلة الرئيسية من معالجة المياه هي المعالجة بالكلور تليها الترشيح وتحلية المياه وأخيرا التخلص من المعادن. يتم اجراء لتحليلات الفيزيائية والكيميائية على كميات مختلفة من المياه المنتجة الرقم الهيدروجيني ليموصلية وما الى ذلك. اظهرت النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها ان كمية ونوعية البخار جيدة وأنها تحصل على نتائج مرضية. كلمات مفتاحية: ماء البحر، تقطير، تبخر، احتراق، طاقة كهربائية.

## **Abstract**

The objective of the research is to study the various stages of seawater treatment at the Cap-Djinet thermal power station, and to obtain a good amount of steam by using a complete combustion of the water, which allows us to run the turbines, which produce electricity.

The main phase of water treatment is chlorination followed by filtration, desalination and finally the elimination of metals.

Physicochemical analyzes are performed on different quantities of water produced (pH, conductivity, etc.).

The experimental results obtained show that the quantity and the quality of the steam process are good and that we obtain satisfactory results.

Key words: Seawater, Desalination, Evaporation, Combustion, power generation

# *Remerciements*

Nous tenons à remercier notre promotrice

Mme ben abd allah qui a bien voulu nous encadrer pour l'élaboration et le suivi de notre projet de fin d'études.

Nous tenons à remercier également les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail et d'apporter leurs réflexions et suggestions scientifiques.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur Mr.Méchakou karim pour son aide et son encouragement qui n'a épargné aucun effort pour que notre stage se déroule dans de meilleures conditions et tous les responsables et le personnel de la centrale de Cap-Djinet.

Nous profitons de l'occasion pour remercier tous nos enseignants de FSI/UMBB.

Enfin, que toutes celles et tous ceux qui, de près ou de loin nous ont généreusement offert leurs concours à l'élaboration de ce travail, trouvent ici l'expression de notre profonde sympathie.

*Merci*



## Dédicace

Pour que ma réussite soit complète je le partage avec tous les personnes

Que j'aime, je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents qui n'ont pas cessé de prier pour moi et qui m'ont aidé durant toute la durée de mes études, que dieu les garde pour nous.

À ma chère sœur qui a fourni tous leur effort et moyens pour que je termine mes études.

A mes très chers cousins.

À mon binôme hakima avec qui j'ai partagé les plus beaux moments durant notre cursus ainsi que toute sa famille.

À mes amie : bouchra ,sihem,lidia ,waffa

À toute personne ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

À tous mes amis de l'UMBB particulièrement la promo de génie De l'environnement 2022.

Enfin à tous ceux que j'aime et à tous ceux qui m'aiment.

*Selma*





## Dédicace

A la femme la plus courageuse, sensible, généreuse, la plus belle à mes yeux,  
À celle qui a su me donner amour et joie de vivre, à celle qui a toujours montrée  
affection et compréhension à mon égard, le symbole de la tendresse,

Ma mère qui j'aime.

A l'homme de courage et de force à celui qui a toujours été présent,  
Qui m'a appris les vraies valeurs de la vie à celui qui m'a soutenu en toutes  
circonstances,

Mon père que j'aime.

A ceux qui m'ont donné joie et bonheur, mes sœurs Sabrina et Hayat ,sabiha , linda  
A mon binôme et meilleur amie Selma qui j'ai partagé les plus beaux moments ainsi  
que toute sa famille.

A ceux que j'ai eu la chance de connaître, dans les meilleures et pires moments de ma  
vie, à mes amis les plus fidèles.

A tous ceux que j'aime, à tous ceux qui m'aiment, je dédie ce Modeste travail.

*Hakima*



# Liste des tableaux

## **Chapitre I : présentation et principe de fonctionnement de la centrale RAS-DJINET**

Tableau I.1 : caractéristiques des surchauffeurs hautes pression.....	p13
Tableau I.2 : caractéristiques de surchauffeurs moyennes pression.....	p13
Tableau I.3 : caractéristiques des désurchauffeurs .....	p13

## **Chapitre II : Généralité turbine de vapeur**

Tableau II.1 : comparaison entre turbine à gaz et turbine à vapeur(T,P et Pu).....	p31
Tableau II.2 : comparaison entre turbine à gaz et turbine à vapeur (Matériaux et fonctionnement).....	P32

## **Chapitre IV : Etude l'effet des paramètres physico-chimiques sur la vapeur produite**

Tableau IV.1 :résultats journalier d'analyses physico-chimique.....	p66
Tableau IV.2 : Détermination de CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> et HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> à partir du TA et TAC.....	p67
Tableau IV.3 : les analyses physico-chimique.....	p68
Tableau II.3 :résultats journalier d'analyses physico-chimique.....	p66
Tableau II.3 :résultats journalier d'analyses physico-chimique.....	p66

# Liste des Figures

## Chapitre I : présentation et principe de fonctionnement de la centrale RAS-DJINET

Figure I.1 : vue de la centrale de cap Djanet.....	p3
Figure I.2 : plan de masse de la centrale.....	p5
Figure I.3 : organigramme de la centrale.....	p6
Figure I.4 : constitution générale d'un condenseur par surface.....	p8
Figure I.5 : le condenseur.....	p8
Figure I.6 : vue de la bache alimentaire de la centrale.....	p10
Figure I.7 : vue de la chaudière.....	p11
Figure I.8 : corps haute pression (HP) .....	p15
Figure I.9 : l'alternateur.....	p17
Figure I.10 : vue de réchauffeurs.....	p18
Figure I.11 : Salle de commande.....	p19
Figure I.12 : principales transformations d'énergie .....	p20
Figure I.13: le synoptique de cycle.....	p21

## Chapitre II : Généralité turbine de vapeur

Figure II.1 : Le Turbinai lancée en 1897 fut le premier navire à turbine à vapeur.....	p26
Figure II.2 : Rotor d'une turbine à vapeur .....	p 26
Figure II.3 : turbine à vapeur à réaction.....	p 28
Figure II.4 : Représentation schématique d'une installation motrice à vapeur.....	p 33
Figure II.5 : cycle de Carnot dans le Diagramme entropique(T, S).....	p 34
Figure II.6 : Cycle de Rankine d'une IMV et cycle de Carnot associé pour l'eau.....	p 35
Figure II.7 : installation motrice à vapeur fonctionnant sur la base d'un cycle de Hirn..	p 36
Figure II.8 : Cycle de Hirn et cycle de Carnot associé pour l'eau.....	p37

Figure II.9 : Schéma d'une IMV fonctionnant sur la base d'un cycle de Hirn avec surchauffe.....	p38
Figure II.10 : Cycle de Hirn à resurchauffe.....	p39
Figure II.11 : IMV à cycle de Hirn avec quatre soutirages de vapeur.....	p39
Figure II.12 : Cycle de Hirn avec soutirages de vapeur.....	p40
Figure II.13 : IMV à cycle supercritique à deux resurchauffes.....	p42
Figure II.14 : Schéma d'une installation à cycles combinés gaz-vapeur.....	p43
Figure II.15 : Puissance récupéré dans une chaudière de récupération.....	p44
Figure II.16 : Bilans thermique.....	p45
Figure II.17 : Configuration typique d'une centrale à collecteurs cylindro-paraboliques....	p46
Figure II.18 : Champ de collecteurs.....	p47
Figure II.19 : Vue schématique du collecteur cylindro-parabolique.....	p47
Figure II.20 : Tube collecteur.....	p48
Figure II.19 : Schéma de fonctionnement d'une turbine à gaz à compresseur axial.....	p49

### **Chapitre III : La combustion et le rendement indirect de la chaudière**

FigureI.1 : Chaudière à production instantanée.....	p53
FigureI.2 : fonctionnement Chaudière à tubes de fumée.....	p54
Figure I.3 : Chaudière à tubes de fumée.....	p55
Figure I.4 : schéma fonctionnement de la Chaudière à tubes de fumée.....	p55
Figure I.5 : Chaudière à tubes d'eau.....	p56
Figure I.6 : schéma Circulation forcée dans une chaudière à tubes.....	p57
Figure I.7 : Les chaudières/ générateurs .....	p58
Figure I.8 : Représentation schématique du bilan thermique du générateur de vapeur .....	p58

## **Chapitre IV : Etude l'effet des paramètres physico-chimiques sur la vapeur produite**

FigureI.1 : PH mètre.....p62

FigureI.2 : Appareil multi- paramètres de paillasse.....p62

Figure I.3 : détermination de titre hydrométrique (TH).....p63

Figure I.4 : détermination de TAC et TA.....p65

## **Chapitre V : Étude l'effet de la combustion sur la quantité et la qualité de vapeur produite**

FigureI.1 : schéma fonctionnement de la production de la vapeur.....p70

FigureI.2 : Optimisation de la boucle vapeur.....p70

## Nomenclatureur

symbole	désignation	unité
C, O, N, H	Teneur des éléments chimique de gaz naturel	%
Qfsn	Quantité de fumées sèches dans la combustion théorique	Mole
e	L'excès d'air	%
Tf1	Température essai fumées entrée du RA	C°
Tf2	Température essai fumées sortie RA	C°
Cp1	Chaleur spécifique des fumées sèches	C°
Cp2	Chaleur spécifique des fumées sèches	C°
Cpm	Chaleur spécifique moyenne des fumées	Kcal/Kg
Lg	Perte de chaleur par les gaz de combustion	Kcal/Kg
Lmf	Perte de chaleur due l'humidité dans le combustible	Kcal/Kg
Lh	Perte de chaleur due l'humidité dérivante de la combustion	Kcal/Kg
Lma	Perte de chaleur due à l'humidité dans l'air	Kcal/kg
Lco	Perte de chaleur due à la formation d'oxyde de carbone	Kcal/Kg
Lb	Perte de chaleur de rayonnement et convection	Kcal/kg
Lt	perte totale de chaleur	kcal/kg
Wg	Masse de gaz de combustion (kg) masse de combustible	Kg/kg
Cb, s	Teneur en carbone et en soufre dans le combustible	%
Moist	Humidité dans le combustible alimente	%
H2	Enthalpie de vapeur a la pression partielle de humidité et Tref	Kcal/kg
Hv	Enthalpie de vapeur saturée à Tref dans le combustible	Kcal/kg
Ppartielle	Pression partielle saturée	atm
Pa	Pression atmosphérique	Psi,atm
mg	Masse d'humidité dans les fumées	Kg/Kg
Wma	Humidité absolue dans l'air	Kg/kg
Wa	Rapport de air sec /combustion	Kg/kg
$\eta$ RA	Rendement nominal du moteur électrique de réchauffer d'air rotatif	%

$\eta_{vR}$	Rendement nominal du moteur électrique du ventilateur de recyclage	%
$P_{vR}$	Puissance de moteur de ventilateur recyclage	KW
$p_{RA}$	Puissance de moteur de réchauffeur d'air à vapeur	KW
IRA	Intensité de moteur de réchauffeur d'air à vapeur	A
Q <sub>int</sub>	Chaleur introduit	Kcal/kg
P <sub>int</sub>	Puissance introduit	Kcal/kg
B	Crédit total	Kcal/kg
B <sub>fe</sub>	Chaleur sensible fourni par le combustible	Kcal/kg
B <sub>xe</sub>	Equivalent thermique de l'énergie thermique fournie	Kcal/kg
$\eta$	Rendement de la chaudière	%

# Sommaire

Remerciement

Dédicace

Liste d'abréviation

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale .....p1

## **Chapitre I : présentation et principe de fonctionnement de la centrale RAS-DJINET**

I-1 introduction: .....p3

I-2 Historique : .....p4

I-3 implantation: .....p4

I-4 données météorologique : .....p5

I-5 organigramme : .....p6

I-6 Description et caractéristique : .....p7

I-6-1 Condenseur : .....p7

I-6-2 Les pompes d'extraction : .....p9

I-6-3 La bêche alimentaire : .....p9

I-6-4 Les pompes alimentaires : .....p10

I-6-5 Les pompes de circulation : .....p11

I-6-6 La chaudière : .....p11

I-6-6-1 l'économiseur : .....p12

I-6-6-2 Le ballon chaudière : .....p12

I-6-6-3 Les écrans vaporisateur : .....p12

I-6-6-4 Circuits de vapeur : .....p13

I-6-6-5 Les brûleurs : ..... p14

I-6-6-6 Chambre de combustion : .....p14

I-6-6-7 Ventilateurs de soufflage : .....p14

I-6-6-8 Ventilateurs de recyclage : .....p14

I-6-7 La turbine à vapeur : .....	p14
I-6-7-1 Corps HP (haute pression) : .....	p14
I-6-7-2 Corps MP (moyen pression ) : .....	p15
I-6-7-3 Corps BP (basse pression ) : .....	p15
I-6-8 L'alternateur : .....	p16
I-6-9 Les réchauffeurs : .....	p17
I-6-9-1 Les réchauffeurs d'air : .....	p17
I-6-9-2 Les réchauffeurs de haute pression (HP) : .....	p17
I-6-9-3 Les réchauffeurs de basse pression (BP) : .....	p18
I-6-10 Salle de commande : .....	p18
I-6-11 Fonctionnements d'une tranche de production : .....	p19
I.6.12 station de filtrage et de pompage d'eau de mer :.....	p21
I.6.13 stations de dessalement et de déminéralisation d'eau de mer :.....	p21
1.6.14 station de production hydrogène : .....	p22
1.6.15 poste de gaz : .....	p23
1.6.16 poste fuel: .....	p23

## **Chapitre II : Généralité turbine de vapeur**

I.1. Turbines à vapeur ... ..	p25
I.1.1. Définition .....	p25
I.1.2. Historique des turbines à vapeur .....	p25
I.1.3. Principe d'une turbine à vapeur .....	p25
I.1.4. Utilisation des turbines à vapeur dans l'industrie .....	p27
I.1.5. Spécification des turbines nucléaires .....	p27
I.1.6. Réalisation de turbine à vapeur .....	p28
I.1.7. Classification des turbines à vapeur .....	p29
I.1.7.1. selon l'utilisation .....	p29
I.1.7.2. Selon la forme de la veine de vapeur .....	p29
I.1.7.3. Par le nombre d'étages de rotor .....	p29
I.1.7.4. Par le mode d'action .....	p29

1.1.7.5. selon le mode de construction .....	p30
1.1.8. Comparaison avec la turbine à gaz .....	p30
1.1.8.1. Comparaison de point de vue thermodynamique .....	p30
1.1.8.2. Comparaison de point de vue technologique.....	p31
1.2. CYCLES DES INSTALLATIONS MOTRICES A VAPEUR .....	p33
1.2.1. Principe d'une installation motrice à vapeur .....	p33
1.2.2. Cycle de Carnot .....	p34
1.2.3. Cycle de Rankine et cycle de Hirn .....	p35
1.2.3.1. Description .....	p35
1.2.3.2. Expressions du rendement théorique .....	p37
1.2.4. Cycle de Hirn avec resurchauffe.....	p38
1.2.5. cycle de Hirn avec soutirage de vapeur.....	p39
1.2.6. Cycle supercritique .....	p40
1.3. Cycle combine gaz -vapeur .....	p41
1.3.1. principe d'une installation à cycle combiné.....	p42
1.3.2. cycle combiné à un niveau de pression .....	p43
1.3.3. analyse énergétique du cycle combiné (gaz-vapeur).....	p44
1.3.4. Cycle a plusieurs niveaux de pression .....	p44
1.4. Capteur cylindro-parabolique .....	p45
1.4.1. Le collecteur .....	p46
1.4.2. Turbines à gaz.....	p48

### **Chapitre III : La combustion et le rendement indirect de la chaudière**

I-1 introduction: .....	p50
I-2 Combustion: .....	p50
I-3 Rendement de la chaudière : .....	p51
I-4 Les différentes pertes dans la chaudière: .....	p51
I-5 Rendement de la chaudière : .....	p51
I-6-1 Pertes par chaleur sensible des gaz secs: .....	p52
I-6-2 Pertes par chaleur latente des gaz: .....	p52

I-6-3 Pertes par échauffement et vaporisation de l'eau:.....	p52
I-6-3 Pertes par rayonnement: .....	p52
I-6-4 Bilan énergétique de la chaudière: .....	p52
I-7 Connaître le rendement énergétique d'une chaudière.....	p52
I-8 Les différents types de chaudières : .....	p53

#### **Chapitre IV : Etude l'effet des paramètres physico-chimiques sur la vapeur produite**

I-1 L'eau de mer: .....	p60
I-2 Composition de l'eau de mer: .....	p60
I-3 Analyses physico-chimiques: .....	p61
I-4 Mesure de potentiel d'hydrogène(PH): .....	p61
I-5 Mesure de la conductivité: .....	p62
I-6-1 Détermination de la dureté totale(TH): .....	p62
I-6-2 Mesure de L'alcalinité: .....	p64
I-6-3 Titre alcalimétrique simple (TA):.....	p64
I-6-3 Titre alcalimétrique complet (TAC): .....	p64
I-6-4 Les résultats physico-chimiques: .....	p66

#### **Chapitre V : Étude l'effet de la combustion sur la quantité et la qualité de vapeur produite**

I-1 a production de vapeur: .....	p70
I-2 Optimisation de la boucle vapeur: .....	p70
I-3 La quantité de la vapeur: .....	p71
I-4 Validation de l'énergie contenue dans la vapeur sur base des données des compteurs et débitmètre .....	p72
I-5 Réduire la pression vapeur en sortie chaudière: .....	p73
I-6-1 Exploitation optimale de la production de vapeur.....	p73
I-6-2 la distribution de la vapeur: .....	p74
<b>COCNLUSION</b> .....	p76
<b>Bibliographie</b> .....	p78

# **Introduction Générale**

# Introduction générale

Le secteur de l'énergie est l'un des éléments les plus stratégiques pour l'économie. L'importance de son rôle dans le développement d'un pays est énorme. Pour cela, aucune nation ne saurait y prétendre sérieusement avant de se doter tout d'abord d'une source d'énergie aussi importante que celle de l'électricité.

Les centrales thermiques sont des installations qui transforment la chaleur fournie par une source d'énergie, en énergie électrique. Cette dernière est produite par divers moyens, c'est ce qui différencie les centrales (centrale hydraulique, diesel, à charbon, à gaz, à vapeur).

La centrale thermique de Cap Djinet est une centrale thermique à vapeur qui fait appel aux caractéristiques thermodynamiques de l'eau de mer dans un but de transformation d'énergie. L'eau de mer, de par sa nature, est très corrosive vis-à-vis des matériaux de construction.

Elle est chargée de sels, de gaz dissous et de solides en suspension. Par conséquent, si elle n'est pas traitée, son utilisation pose un certain nombre de problèmes opérationnels qui limitent l'efficacité des installations. L'objectif de ce traitement est de diminuer ou d'éliminer totalement ces particules en fonction de l'usage prévu pour l'eau.

Le projet s'articule autour des points suivants :

- Le premier chapitre consiste à faire une présentation générale de la centrale thermique de Cap Djinet ainsi que le rôle de ses différents équipements avec leurs caractéristiques principales.
- Le deuxième chapitre résume les différents éléments de turbines à vapeur avec les cycles thermodynamiques les plus utiles, tout en insistant sur l'influence de ces derniers surtout en faisant ressortir l'importance de l'effet de soutirage sur le fonctionnement de la turbine.
- Le troisième chapitre présente la combustion et le rendement indirect de la chaudière
- Ensuite, le quatrième chapitre étudie l'effet des paramètres physico-chimiques sur la vapeur produite.
- A la fin, le cinquième chapitre étudie l'effet de la combustion sur la quantité et la qualité de vapeur produite.

# **Chapitre 1**

## **Présentation et principe de fonctionnement de la centrale RAS- DJINET**

### I.1-Introduction :

La centrale thermique de CAP – DJINET se situe au bord de la mer à l'est d'Alger, près de la ville de Ras-Djinet dans la wilaya de Boumerdès, elle occupe une superficie de 35 *hectares*, et est composée de quatre (04) tranches de type thermique à vapeur d'une puissance unitaire de 176 *MégaWatts (MW)* Bornes alternateur, totalisant une capacité installée de 704 *MW*.

La puissance fournie au réseau est de 672 *MW* bornes usine. La consommation totale des auxiliaires des quatre tranches et des auxiliaires communs est d'environ 32 *MW*. Elle fonctionne d'après les circuits suivants : [Djn][Djn1][Bo-At].



**Figure 1 : vue de la centrale de cap –Djanet**

### I.2- Historique :

La centrale a été construite par un consortium Austro-allemand : KWU (Kraftwerk-AG de RFA), SGP (Semmering GRAZ paucker d'Autriche) et Siemens d'Autriche également qui avait la responsabilité des études, de la supervision du montage et de contrôle de l'ouvrage, ainsi que d'une entreprise Espagnole DRAGADOS à laquelle a été confiée la réalisation de la prise de Léau de mer. Les principales entreprises algériennes qui ont participé à la réalisation de la centrale sont les suivantes : GENISIDER : (réalisation des terrassements généraux, de tout le génie civil, réalisation de la station de pompage et mise en place des tuyauteries de refroidissement) ; INERGA : (réalisation du génie civil de la base inter-entreprises) ; S.N.L.B : (fourniture et montage de la base inter-entreprises de chantier) ; PROSIDER : (fourniture et montage de tous les hangars du chantier) ; ENATUB (fourniture des tuyauteries constituant le circuit de refroidissement) ; SNIC (sablage et peinture) ; SONATRAM (travaux de dragage en mer) ; SOGEP (travaux de peinture), [1].

La mise en service des groupes de production s'est déroulée comme suit :

- Groupe 1 en Décembre 1985
- Groupe 2 en Avril 1986
- Groupe 3 en Septembre 1986
- Groupe 4 en décembre 1986

### I.3 implantation :

La centrale thermique de CAP DJINET se situe au bord de la mer à l'est d'Alger, dans la wilaya de Boumerdes, à 30 Km de l'est du centre de wilaya, et à 1 Km à l'ouest de la ville de Cap-Djinet. Elle occupe une superficie de 35 hectares.

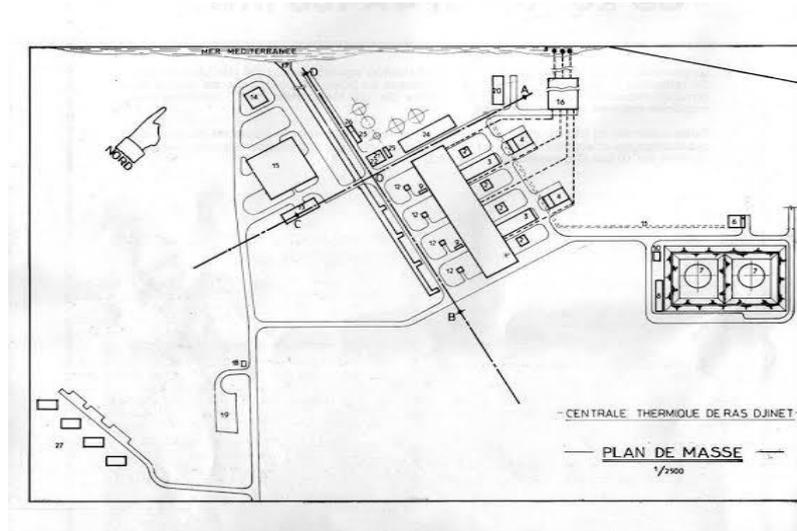


Figure 2 : plan de masse de la centrale

#### I.4.données météorologique :

L'emplacement de la centrale est exposée à un climat méditerranéen, caractérisé par un degré d'humidité élevé tant en été qu'en hiver. La zone est exposée aux gicllements d'eau et n'a aucune protection contre le vent.

L'emplacement est considéré poussiéreux. Les conditions moyennes de l'environnement sont les suivantes :

- Température maximale .....45C°
- Température minimale .....0C°
- Température moyenne du projet .....20C°
- Humidité de l'aire .....50%-80%
- Moyen de pluies .....750mm

I.5 : organigramme :

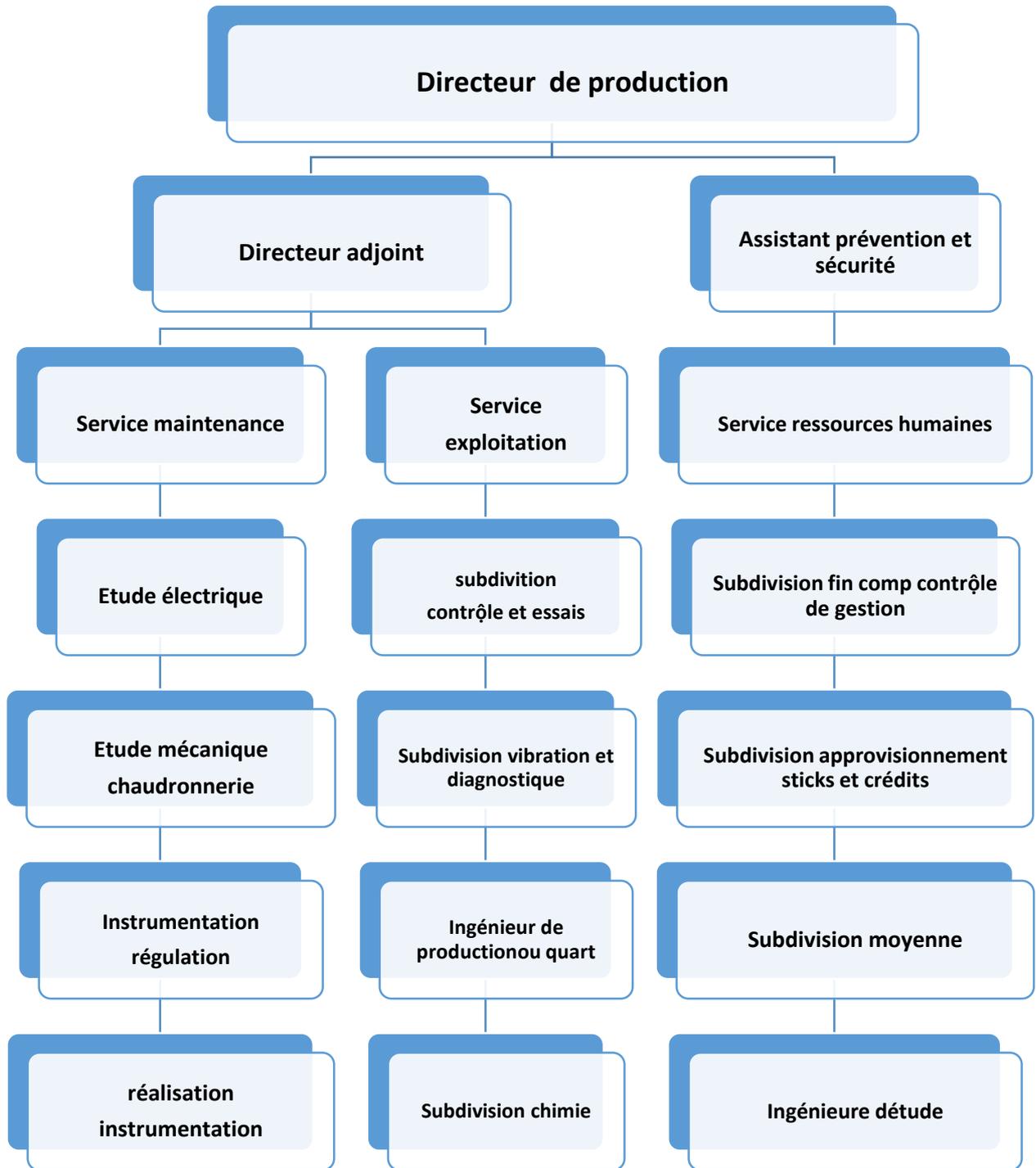


Figure 3 : organigramme de la centrale

### 1.6 Description et caractéristique :

La centrale de production d'électricité de cap-Djinet est une centrale composée de quatre groupes d'une puissance unitaire de 176MW comprenant des installations communes :

- Station de pompage d'eau de mer
- Poste de détente gaz naturel
- Poste fuel
- Station de dessalement
- Station d'électro-chloration
- Salle de compresseurs d'air comprimé de travail et de régulation

Et pour chaque groupe :

- Générateur de vapeur
- Turbine à vapeur
- Condenseur
- L'alternateur
- Auxiliaire électrique
- Salle de commande centralisée
- transformateur principale d'évacuation de l'énergie
- Dessalement de l'eau de mer
- Les pompes

Les équipements les plus importants dans la centrale thermique sont :

- Le condenseur
- Les pompes d'extraction
- La bache alimentaire
- Les pompes alimentaires
- Les pompes des circulations
- La chaudière
- La turbine
- L'alternateur
- Les réchauffeurs

#### I- 6-1 : condenseur :

Le condenseur est un échangeur thermique qui assure la condensation de la vapeur évacuée du corps BP de la turbine par la circulation de l'eau de mer de refroidissement (débit de  $2 \times 12000 \text{ m}^3/\text{h}$ ) .dans les 14850 tubes en titane contenu dans le condenseur.

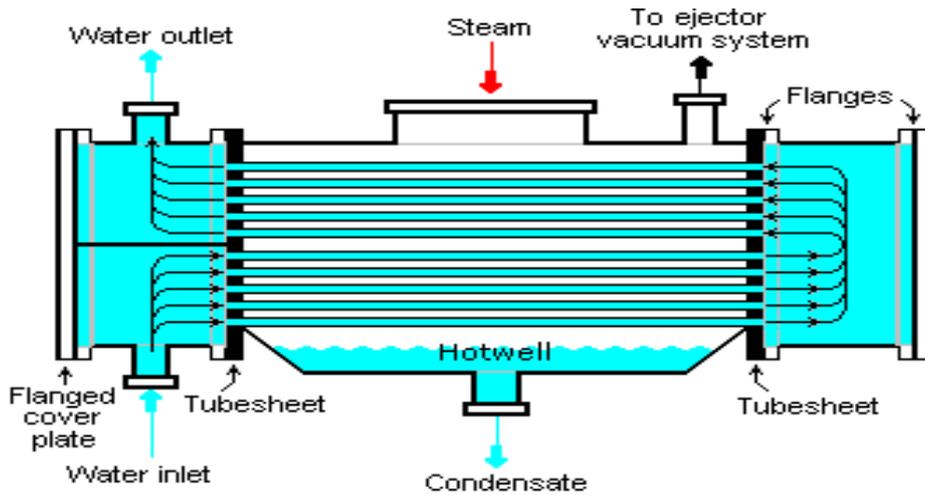


Figure 4 : constitution générale d'un condenseur par surface



Figure 5 : le condenseur

Les principales fonctions de condenseur sont :

- D'assurer la condensant de la vapeur évacuée du corps basse pression de la turbine et de réintroduire le condensant dans le circuit eau vapeur.
- De dégazer le condensant et d'évacuer les incondensables.
- Augmenter la chute d'enthalpie de la turbine.

**Caractéristique du condenseur :**

- Pression dans le condenseur : .....0,07bar absolue.
- Capacité du puits entrée /sortie : .....eau de mer 6°à 8C°
- Surface d'échange : .....10101m<sup>2</sup>
- Masse de condenseur à vide : .....258,5 tonnes
- Matériau de tube : .....titans
- Vitesse de l'eau dans les tubes : .....1,8 m /s

- Débits vapeur : .....98,25Kg/s
- Débits l'eau de refroidissement : .....6500kg/s(eau de mer )
- Nombre de tubes : .....14850
- Longueur des tubes : .....11490mm
- La température de sortie : ..... 32,9C°
- La pression de sortie : .....0,05 bars

### I.6.2 : Les pompes d'extraction :

Ce sont des pompes centrifuges à 4 étages, Elles ont pour rôle d'extraction de l'eau condensée et sont refoulement jusqu'à la bache alimentaire à travers les réchauffeurs basse pression, réfrigèrent d'été, condenseur de buées et les éjecteurs de service.

### Les caractéristiques des pompes d'extraction :

- Pression ( hauteur à débits nul ).....19,7bar
- Pression de service (hauteur totale) ..... 16,8 bar
- Débits nominale .....414 m<sup>3</sup>/h
- Température de sortie .....33C°

### I.6.3.La bache alimentaire :

C'est un réservoir, généralement de forme cylindrique, en position verticale ou horizontale, réalisé en tôle d'acier carbone ou en acier inoxydable. Elle est montée sur un socle et calorifugée.

La bache alimentaire est une réserve d'eau qui alimente une chaudière, génératrice de vapeur et sécurise son approvisionnement en eau sans risque d'interruption.

L'eau réchauffée est directement en contact avec la vapeur de soutirage N°4 venant du corps MP de la turbine, elle est pulvérisée dans la vapeur.

Les caractéristiques d'une bache alimentaire :

- Le volume total .....163m<sup>3</sup>
- Le diamètre de l'enveloppe.....3,6m
- La longueur de la bache .....16,5m
- La température a la sortie de la bache.....151C°
- La pression a la sortie de la bache .....4,9bars
- Le débit .....145,34Kg/s



**Figure 6 : vue de la bache alimentaire de la centrale**

### **Dégazeur :**

Le dégazage a pour but d'éliminer l'oxygène ( $O^2$ ) dissous dans l'eau pour protéger l'installation et la chaudière contre la corrosion .il contient une chambre de mélange pour les condensant à dégazer, une plaque de dégazeur et un collecteur horizontal, zone de collecte et d'évacuation des incondensable.

### **I.6.4 : les pompes alimentaires :**

Ces sont des pompes à aspiration et refoulement radial, les pompes alimentaires servent à refouler l'eau de la bache alimentaire vers la chaudière à travers les réchauffeurs a haut pression et l'économiseur, ces pompes sont de deux types :

#### **➤ pompes nourricières :**

Ce sont des pompes auxiliaires de type centrifuge à un étage, elles servent à augmenter la pression de l'eau d'alimentation de 4,9 bars jusqu'à 11bars avec un débit de 261,6t/h.

#### **➤ pompes principales :**

Ce sont des pompes centrifuges radiales à six étages, elles sont placées en aval des pompes nourricières, elles servent à augmenter la pression de l'eau de 11bars jusqu'à 177bars, il y a

trois pompes alimentaires de chaque groupe et dans chaque groupe il existe trois pompes nourricières qui sont liées à trois pompes principales ,deux pompes pour le fonctionnement et une pompe réservée en cas de panne et chaque groupe de pompes d'alimentation est commandé par un moteur commun d'une tension de 6,3KV et une puissance de 300KW.

### I.6.5 : Les pompes de circulation :

Ce sont des pompes de type vertical semi axiales, il y a huit pompes dans la centrale, les pompes de circulation assurent la circulation d'eau de mer pour le refroidissement des condenseurs des quatre groupes.

#### Les caractéristiques des pompes de circulation :

- Débit .....3,6m<sup>3</sup>/s
- Hauteur .....13,8m
- Puissance.....576,6 KW
- vitesse.....423t/min

### I.6.6 : La chaudière :

la chaudière utilisée est de type à circulation naturelle qui a pour rôle de faire passer l'eau d'alimentation de l'état liquide à l'état vapeur « surchauffée » pour tourner le corps **HP** de la turbine et vapeur « resurchauffée » pour le corps **MP**. C'est l'un des éléments essentiels de circuit thermique. [2]



Figure 7 : vue de la chaudière

La chaudière se compose de plusieurs organes :

### I.6.6.1 : L'économiseur :

C'est une tuyauterie en forme de serpent qui se trouve dans la partie supérieure de la chaudière, il prend la chaleur des fumées de la chaudière comme source thermique pour réchauffer l'eau progressivement avant qu'elle soit versée dans le ballon chaudière.

#### Caractéristiques :

- Débit d'eau d'alimentation .....523t/h
- Débit d'eau à transvasant l'économiseur.....650,3t/h
- Pression de service .....164,3 bars

### I.6.6.2 : le ballon chaudière :

C'est un grand réservoir où on trouve la phase liquide et la phase vapeur, il joue le rôle d'une séparation entre l'eau qui arrive de l'économiseur et de la vapeur qui arrive des vaporisateurs.

#### Caractéristiques :

- pression de service .....160bars
- température .....347 C°
- volume d'eau .....26,9m<sup>3</sup>

### I.6.6.3 : Les écrans vaporisateurs :

Les écrans vaporisateurs forment les quatre parois de la chaudière, l'eau descend à partir du ballon chaudière vers ces écrans vaporisateurs en passant par les colonnes de descente qui sont disposées dans les quatre coins de la chaudière, alors l'eau commence à s'évaporer grâce à la pression des huit brûleurs.

#### Caractéristiques :

- Pression de service .....160bars
- Surface de chauffe.....1980bars
- Volume de eau .....37m<sup>3</sup>

### I.6.6.4 : circuits de vapeur :

### 1) Les surchauffeurs hautes pression :

Leurs rôle est de surchauffer la vapeur saturée sortant du ballon chaudière.

**Caractéristiques :**

Caractéristiques	Surchauffeur primaire	Surchauffeurs secondaire	Surchauffeurs final
Nombre de files	2*128	4*64	2*128
Surface de chauffe	1565 m <sup>2</sup>	518m <sup>2</sup>	538m <sup>2</sup>
Pression de service	160 bars	150bars	145,6bars
Température de sortie	427C°	480C°	540C°

**Tableaux 1.1 : caractéristiques des surchauffeurs hautes pression**

### 2) Les resurchauffeurs moyens pression :

Ils ont un rôle identique à celui des resurchauffeurs, à savoir élever la température de la vapeur resurchauffeurs provenant de la turbine.

**Caractéristiques :**

Caractéristiques	Désurchauffeurs de la vapeur surchauffée	Désurchauffeurs de la vapeur resurchauffée
Surface de chauffe	1832m <sup>2</sup>	929m <sup>2</sup>
Pression de sortie	39bars	37 bars

**Tableaux 1.2 : caractéristiques de surchauffeurs moyennes pression**

### 3) Les désurchauffeurs :

Les désurchauffeurs sont disposés entre les surchauffeurs et les resurchauffeurs, ils ont pour rôle de stabiliser la température de la vapeur surchauffée qui sort de la chaudière par l'injection des gouttelettes d'eau.

**Caractéristiques :**

Caractéristiques	Désurchauffeurs de la vapeur surchauffée	Désurchauffeurs de la vapeur resurchauffée
Débit d'eau	35,7 t/h	4,6t /h
Pression d'entrée	165,4bars	60 bars

**Tableaux 1.3 : caractéristiques des désurchauffeurs**

### 1.6.6.5 : Les brûleurs :

Le générateur de vapeur est équipé de huit brûleurs fonctionnent au gaz naturel ou fuel léger .ils sont disposées sur quatre étages à la face avant de la chaudière.

### 1.6.6.6 : Chambre de combustion :

Elle représente la source de chaleur du générateur de vapeur, elle est constituée de tubes écrans qui reçoivent la chaleur émise par les flammes des brûleurs.

### 1.6.6.7 : Ventilateurs de soufflage :

Les ventilateurs de soufflage ont pour rôle d'acheminer au générateur de la vapeur d'air nécessaire à la combustion (gaz naturel ou fuel), ils aspirent l'air de l'extérieur et le font parvenir aux brûleurs à travers le préchauffeur à vapeur et le réchauffeur rotatif, chaque tranche est équipée de deux ventilateurs, chacun peut assurer 60% du débit nominal.

### 1.6.6.8 : Ventilateurs de recyclage :

Chaque tranche est équipée de deux ventilateurs de recyclage (ou de recirculation) des fumées, ils aspirent une partie des gaz de combustion à la sortie de la chaudière (avant le réchauffeur d'air) et injectent dans la partie basse de la chambre de combustion, Ce système permet un gain de rendement, surtout à basse charge.

### 1.6.7 : La turbine à vapeur :

C'est l'élément essentiel dans la centrale, elle est installé dans la salle des machines sur des fondations massives, la turbine est composée de trois, corps **HP**, **MP** et **BP**.

#### 1.6.7.1 : Corps HP (haute pression) :

Le corps HP est constituée d'une enveloppe externe en tonneau sous plan de joint axial et enveloppe interne devisée, selon le même plan de joint axial est montée à l'intérieur de l'enveloppe externe, il est à simple flux avec un soutirage S6 qui alimente les réchauffeurs haute pression (HP6).

- à l'entrée du corps :
  - pression =138 bars
  - température =540C°
- à la sortie du corps :
  - pression = 40 bars
  - température =357C°



**Figure 8 : corps haute pression (HP)**

#### **1.6.7.2 : corps MP (moyen pression) :**

Ce corps est composé d'une enveloppe externe, sous plan de joint horizontal et l'enveloppe interne à double flux, la vapeur resurchauffé pénètre au milieu de l'enveloppe par le bas et par le haut, il est à double flux avec deux soutirages S5 et S4.

- à l'entrée du corps :
  - pression : 35,9 bars
  - température : 535 C°
- à la sortie du corps :
  - pression : 5,25 bars
  - température : 282 C°

#### **1.6.7.3 : corps BP (basse pression) :**

Ce corps est composé de trois enveloppes à plan joint horizontal, le corps BP est de type double flux composé d'une carcasse et une double enveloppe, la vapeur qui sort du corps MP pénètre dans celui-ci pour empêcher la déformation des enveloppes sous l'effet des dilatations thermiques .

La turbine transforme l'énergie thermique disponible de la vapeur provenant de la chaudière en un mouvement de rotation de l'arbre, tel que le travail mécanique produit sert à entrainer l'alternateur, à la sortie de la turbine la vapeur détendue est conduit au condenseur.

Il est à double flux avec trois soutirages, l'entrée de ce corps est liée directement avec la du corps MP par un conduit.

- Le soutirage (S3) : aliment le 3<sup>ème</sup> réchauffeur (BP) avec une température de 173 C°, et d'une pression de 1,77bar.
- Le soutirage (S2) : aliment le 2<sup>ème</sup> réchauffeur (BP) avec une température de 89C°, et d'une pression de 0,15 bar.
- Le soutirage (S1) : aliment le 1<sup>er</sup> réchauffeur (BP) avec une température de 56C°, et d'une pression de 0,15 bar.

### Les caractéristiques :

- Puissance .....176MW
- Longueur .....13m
- Vitesse .....3000t/h
- Pression .....138 bars
- Température.....450C°

### 1.6.8 : l'alternateur :

L'alternateur est une machine transformatrice, C'est pour cela qu'il transforme l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique.

### Les caractéristiques :

- La puissance maximale produire .....176MW
- La tension .....15,5 MW
- La fréquence.....50Hz
- L'intensité de courant .....8195A



**Figure 9 : l'alternateur**

## **1.6.9 : Les réchauffeurs :**

### **1.6.9.1 : Les réchauffeurs d'air :**

Le réchauffeur d'air de la centrale thermique de RAS-DJINET est du type rotatif ( LINJUSTROM) , Ce réchauffeur est une masse métallique de forme circulaire en rotation selon un arbre vertical , qui se trouve alternativement plongée dans le gaz chaud et dans l'air à réchauffer , parmi les avantages de ce Réchauffeurs est l'accélération des réaction de combustion et diminution de l'encrassement par réduction des suies de fait d'une combustion plus complète .

### **1.6.9.2 : Les réchauffeurs de haute pression (HP) :**

Ils sont de nombre de deux (02) (HP5et HP6), leurs rôle est de réchauffer Léau d'alimentation lors de son transfert dans la chaudière. Ils sont alimentés par les deux soutirages (S5) et (S6) provenant respectivement du corps moyen pression (MP) et haut pression (HP) de la turbine.

Les réchauffeurs utilisés sont des échangeurs de chaleurs à échange par surface. Ils sont positionnés verticalement avec tubes courbés en forme de serpent, dans le coté enveloppe

circule la vapeur, et dans le coté tube circule l'eau d'alimentation (condensât) avec une pression de 160 bars et une température de 145C°.

### 1.6.9.3 : Les réchauffeurs de basse pression (BP) :

Le rôle de ces trois (03) réchauffeurs (BP1, BP2 et BP3) est de réchauffer le condensât lors de son transfert vers la bêche alimentaire. Ils sont alimentés par les trois (03) sous tirages (S1), (S2) et (S3) qui viennent du corps(BP) de la turbine.

Les réchauffeurs utilisés sont des échangeurs de chaleurs à échange par surface. Ils sont positionnés horizontalement en tube (en forme U), et l'écoulement de le condensât se fait en cascade, dans le coté tube circule le condensât principale et dans le coté enveloppe circule la vapeur, et la température dépasse les 100C°.



**Figure10 : vue de réchauffeurs**

### 1.6.10 : salle de commande :

Chaque paire de tranches est contrôlée et réglée depuis une salle de commande, Cette dernière comprend pour chaque paire de tranche :

- Deux pupitres de conduites.
- Deux tableaux verticaux où sont rassemblés les organes de commande et les appareils d'enregistrement de la plus grande partie des paramètres.
- Un tableau synoptique schématisant les auxiliaires électriques.



**Figure 11 : Salle de commande**

### **1.6.11 : Fonctionnements d'une tranche de production :**

Avant décrire le fonctionnement de la centrale, il est bon de rappeler des différents transformations énergétiques qui ont servi à la production de l'énergie électrique (Figure N°12). En gros on a trois transformations.

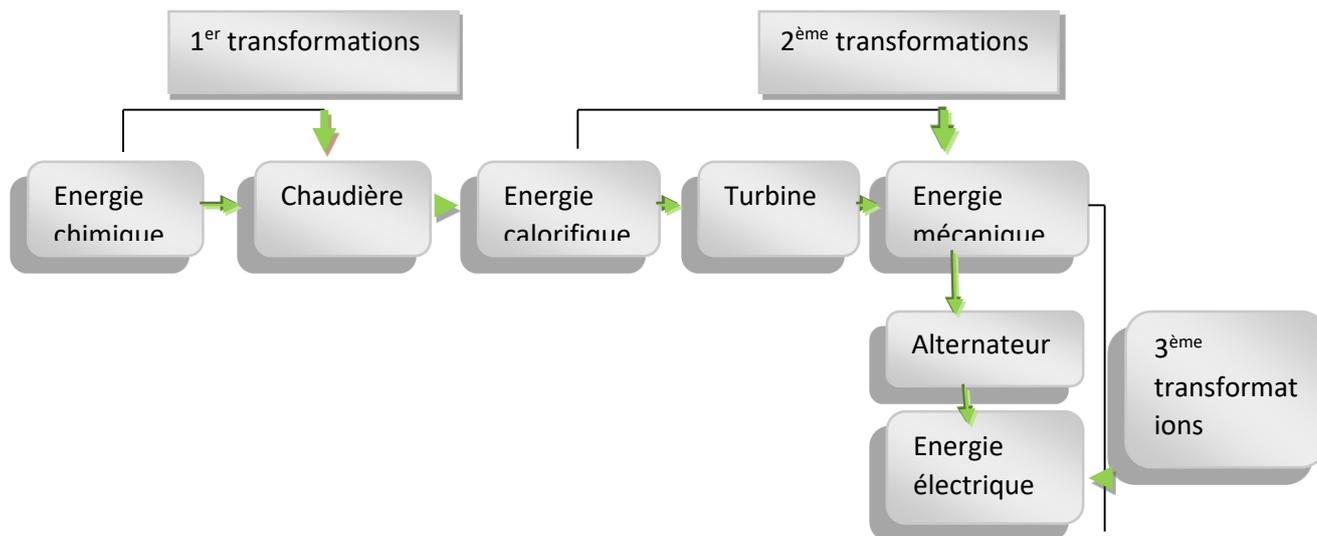


Figure N° 12 : principales transformations d'énergie

L'eau froide est aspirée à la bache alimentaire alimenter par le condenseur, et par l'eau d'appointé après distillation, elle est comprimée successivement par les pompes basse pression et haute pression et réchauffer par les réchauffeurs **HP** et **BP**.

Au moyen de vapeur des soutirages, l'eau d'alimentation en sortant des réchauffeurs HP va évacuer dans la chaudière est particulièrement dans l'économiseur, l'eau se réchauffe par convection par les biais des famées résultats de la chambre de combustion, elle est canalisée ensuite vers le ballon.

A la sortie de l'économiseur, l'eau est encore à l'état liquide, pour avoir le vapeur il faut encore la chauffer. Alors, du ballon, descend vers les écrans vaporisateurs.

Au contact de la flamme des brûleurs l'eau devient vapeur et monte naturellement jusqu'au ballon de fait de la différence de densité de l'eau et de vapeur.

Dans le ballon s'opère une séparation de l'eau et de la vapeur, puis celle-ci est transmise à la surchauffeur par les tubes supportes.

A la sortie de surchauffeurs final, la vapeur est acheminée vers la turbine pour subir la détente, la vapeur d'échappement en partie détendue est refroidie dans la partie HP, est ramenée à la chaudière pour une resurchauffe.

A la sortie des resurchauffeurs la vapeur poursuite sa détente dans le corps MP puis dans le corps BP, la vapeur détendue est conduite au condenseur. La condensation de la vapeur s'effectue sous vide à la température 33C° et à la pression 0,05 bars.

Les pompes d'extraction aspirent l'eau du puits de condenseur et la refoulent à travers le réfrigérant d'alternateur, et les trois réchauffeurs basse pression jusqu'à la bache alimentaire.

Dans la bache alimentaire s'effectue le dégazage physique de l'eau d'alimentation, et un nouveau cycle peut recommencer (Figure N° 13).

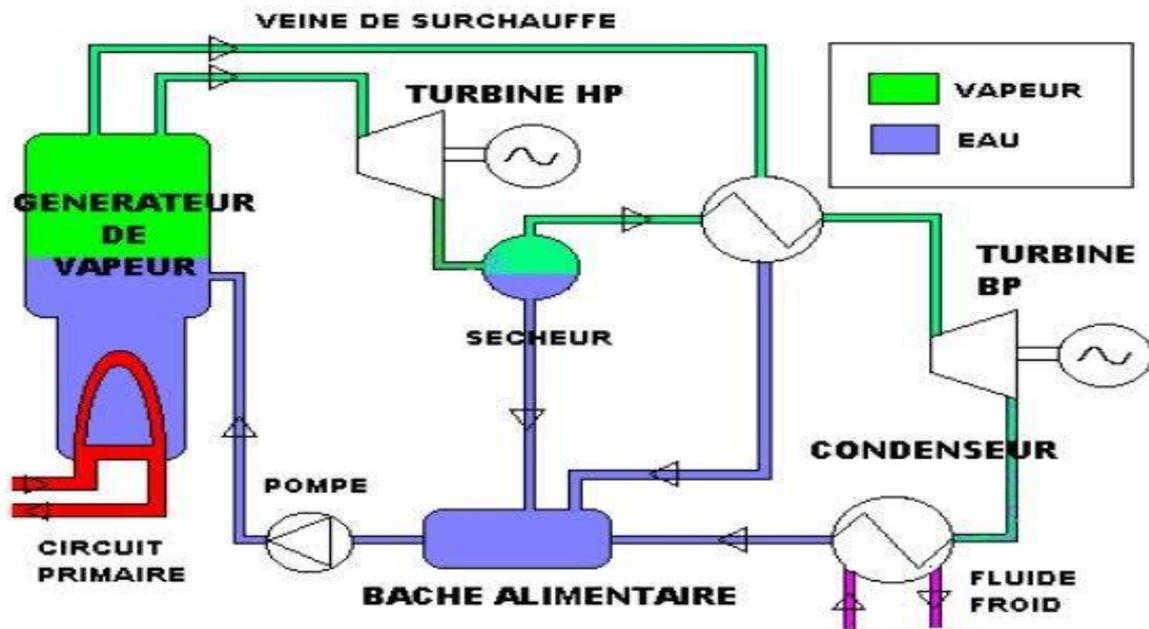


Figure N°13 : le synoptique de cycle

### 1.6.12 : station de filtrage et de pompage d'eau de mer :

Trois conduites de 03 mètres de diamètre sont installées à une profondeur de 06 mètre de la surface de la terre avec longueur de 900 mètre dans la mer, ce qui permet à l'eau de passer automatiquement vers le bassin par la différence de potentiel (de niveau).

Avant qu'elle soit aspirée, l'eau passe par deux niveaux de filtrage :

- Par des grilles à grappins pour empêcher le passage des grands corps.
- Par des tambours filtrants pour empêcher le passage des petits corps.

Le pompage s'effectue dans des puits situés après la station de filtrage, par trois groupes de pompes déferents pour les besoins de la centrale.

### 1.6.13 : stations de dessalement et de déminéralisation d'eau de mer :

#### 1) Dessalement d'eau de mer :

La station de dessalement a pour rôle la production d'eau dessalée à partir de l'eau de mer.

Quatre unités de dessalement produisant 500m<sup>3</sup>/ jour chacune, assurent la production en eau dessalée, stockée dans deux bâches (2\*2700m<sup>3</sup>).

Type de l'installation : Multi-flash qui sert à vaporiser l'eau de mer pour lui enlever le sel puis la condensée pour obtenir de l'eau dessalée.

Trois produits chimiques sont injectés pour le traitement de l'eau qui est les suivants :

- **Le belgard EVN** : inhibiteur d'incrustation utilisée pour éviter l'entartage
- **La belite (M33)** : produit anti-mousse utilisée pour éviter la formation de la mousse au niveau des évaporateurs.
- **Les bisulfites de sodium (NA<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>)** : produit permettant du chlore dans l'eau pour diminuer la conductivité.

### 2) Déminéralisation :

Deux chaînes de déminéralisation de 40m<sup>3</sup>/h chacune parachèvent le traitement d'eau avant son utilisation dans le cycle.

Le stockage d'eau déminéralisée se fait dans deux (02) réservoirs de 1500 m<sup>3</sup> chacun, pour traiter, des pompes de l'eau brute aspire l'eau dessalée de ces réservoirs et la refoule vers filtres à lits mélangé qui est constitué d'un mélange des échangeurs cationique fortement acides et les échangeurs anioniques fortement basiques [3].

### 3) Electro chloration :

La chloration de l'eau de mer permet de préserver l'équipement traversé par l'eau de mer contre tout encrassement pouvant être causé par les micro-organismes marins.

Elle se fait par de hypochlorite de sodium, la production est assurée par une station d'électro chloration (par électrolyse de l'eau de mer d'une capacité de 150kg/h de chlore actif)

- pompes d'alimentation en eau de mer refroidissement
- pompes d'alimentation en eau de mer pour les unités de dessalement.
- pompes d'alimentation en eau de mer pour la station d'électro chloration

#### 1.6.14 : station de la production hydrogène :

Son rôle est de produire hydrogène nécessaire pour le refroidissement des quatre (04) alternateurs de la centrale.

### **1.6.15 : poste de gaz :**

Il est composé de deux (02) lignes de filtration gaz, ainsi que trois (03) lignes de régulation pour la détente gaz, de 60 à 6 bars. [3]

### **1.6.16 : poste fuel :**

Ce deux (02) réservoirs d'une capacité de 10000m<sup>3</sup> chacun. Utilisée en cas d'absence de gaz ou en cas d'incendie sur la conduite d'alimentation de gaz.

# **Chapitre 2**

## **Généralité turbine de vapeur**

## Chapitre 2 | Généralité turbine de vapeur

### I.1. Turbines à vapeur

#### I.1.1. Définition :

La turbine à vapeur est un moteur thermique à combustion externe, fonctionnant selon le cycle thermodynamique dit de Clausius-Rankine. Ce cycle se distingue par le changement d'état affectant le fluide moteur qui est en général de la vapeur d'eau. Elle transforme l'énergie thermique de la vapeur d'eau pendant la détente en énergie mécanique de rotation d'arbre pour entraîner un dispositif mécanique tournant.

Dans cette étude, on se limite à l'étude de la catégorie des turbines à vapeur.

#### I.1.2. Historique des turbines à vapeur :

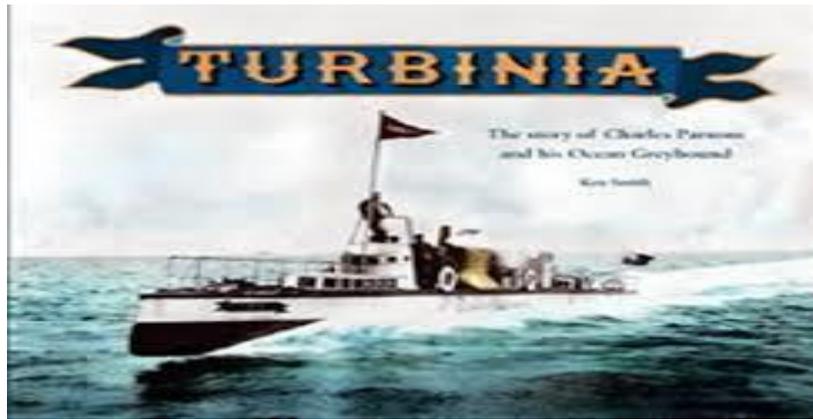
La turbine à vapeur est le fruit du travail de nombreux chercheurs et ingénieurs à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Ces turbines à vapeur sont construites selon deux principes différents (à action, et à réaction), leurs éléments essentiels sont :

- Les tuyères dans lesquelles la vapeur se dilate, engendrant une diminution de sa température et une augmentation de son énergie cinétique.
- Les ailettes fixes et mobiles.
- Un rotor sur lequel sont montées les roues portant les ailettes fixes ou mobiles. Les turbines à vapeur sont largement utilisées dans plusieurs domaines, parmi lesquelles on cite :
- La production d'électricité à partir de l'énergie thermique.
- La propulsion navale.

#### I.1.3. Principe d'une turbine à vapeur :

Le cycle thermodynamique de la turbine à vapeur comprend au moins les étapes suivantes

- L'eau liquide est comprimée par une pompe et envoyée vers la chaudière.
- L'eau est chauffée, vaporisée et surchauffée dans la chaudière.
- La vapeur se détend dans la turbine en fournissant de l'énergie mécanique.
- La vapeur détendue est condensée au contact de la source froide sous vide partiel.



**Figure I.1 : Le Turbinai lancée en 1897 fut le premier navire à turbine à vapeur.**

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

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

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



**Figure I.2 : Rotor d'une turbine à vapeur.**

## Chapitre 2 | Généralité turbine de vapeur

L'eau utilisée nécessite un traitement pour éviter toute conséquence qui pourrait engendrer sa perturbation au niveau de la turbine tel que la corrosion et le bouchage des chaudières.

L'eau traitée par le passage dans les postes de traitement alimente les bacs alimentaires de la centrale et de l'unité, ensuite elle subit un dégazage physique et chimique (utilisant des produits qui éliminent l'oxygène) et enfin vers les chaudières, la turbine à vapeur est placée entre la source chaude (générateur de vapeur) et la source froide (condenseur) elle assure la transformation de l'énergie disponible de la vapeur en énergie mécanique de rotation avec le minimum possible de perte. La vapeur surchauffée arrive à la turbine avec moyenne pression pour se détendre, puis dans un condenseur qui est traversé de l'autre côté par de l'eau froide, la vapeur se condense et l'eau condense est refoulée par la pompe vers le générateur en suivant un circuit fermé.

### **I.1.4. Utilisation des turbines à vapeur dans l'industrie :**

Du fait de leurs caractéristiques, les turbines à vapeur sont très employées dans les centrales thermiques à vapeur de moyenne et forte puissance, Elles sont utilisées dans les applications de cogénération (incinérateur de déchets et chauffage urbain, procès industriel). Il faut également signaler leur usage dans les cycles combinés ou elles permettent de valoriser en électricité la chaleur d'échappement des turbines à gaz.

Les turbines à vapeur sont également employées dans le domaine de la propulsion navale, notamment pour les plus gros vaisseaux (pétroliers, porte-avions) mais elles sont de plus en plus souvent remplacées par des moteurs diesel ou des turbines à gaz. La fonction d'entraînement de machines est également en voie de disparition au profit des moteurs électriques.

### **I.1.5. Spécification des turbines nucléaires :**

Le cycle à vapeur des centrales nucléaires est particulier. En effet, dans les réacteurs à eau sous pression actuellement très répandus, la chaleur issue de la fission est évacuée du cœur par un circuit primaire d'eau surchauffée à environ 150 bars et 300°C. Cette chaleur produit de la vapeur saturée dans le circuit secondaire. En sortie d'étage haute pression, la vapeur subit un séchage (séparation des gouttelettes liquides) et une surchauffe modérée (par de la vapeur en sortie du générateur de vapeur). Du fait de la température limitée de la source chaude, et donc de la vapeur créée, le rendement du cycle reste faible à environ 30%. Les centrales nucléaires ont des groupes turbo-alternateur très puissants pouvant atteindre 1400 MW.

## Chapitre 2 | Généralité turbine de vapeur

### I.1.6. Réalisation de turbine à vapeur :

La réalisation des turbines nécessite le recours à des aciers fortement alliés (Cr-Ni-Va) pour résister aux contraintes thermiques, mécaniques (force centrifuge) et chimique (corrosion par la vapeur). Les deux premières contraintes limitent le diamètre et donc le débit capable des derniers étages. Ainsi des aubes de plus d'un mètre de longueur posent déjà de sérieux problèmes de réalisation.

De plus, l'hétérogénéité radiale des vitesses impose une incidence variable de l'aube qui présente alors une forme gauche dont l'usinage est complexe.

En pratique la température est limitée à 550 ou 580°C et le maximum mis en œuvre est de 650°C. La pression est de l'ordre de 180 bars et atteint 250 bars pour les installations supercritiques.

De ce fait, les turbines de forte puissance comprennent généralement sur un même axe :

- Une turbine haute pression.
- Plusieurs (2 ou 3) turbines basse pression avec soutirages.
- Il est ainsi possible d'atteindre des puissances de plus de 1000 MW avec un rendement dépassant légèrement 40%.

À l'autre extrémité, les plus petites turbines ont des puissances de quelques dizaines de KW. Elles comprennent généralement un seul étage et servent à l'entraînement de machines dans l'industrie ou sur des navires. Entre les deux, existe toute une palette de turbines plus ou moins complexes et adaptées à des usages industriels spécifiques (à soutirage, à contrepression, ...etc.).

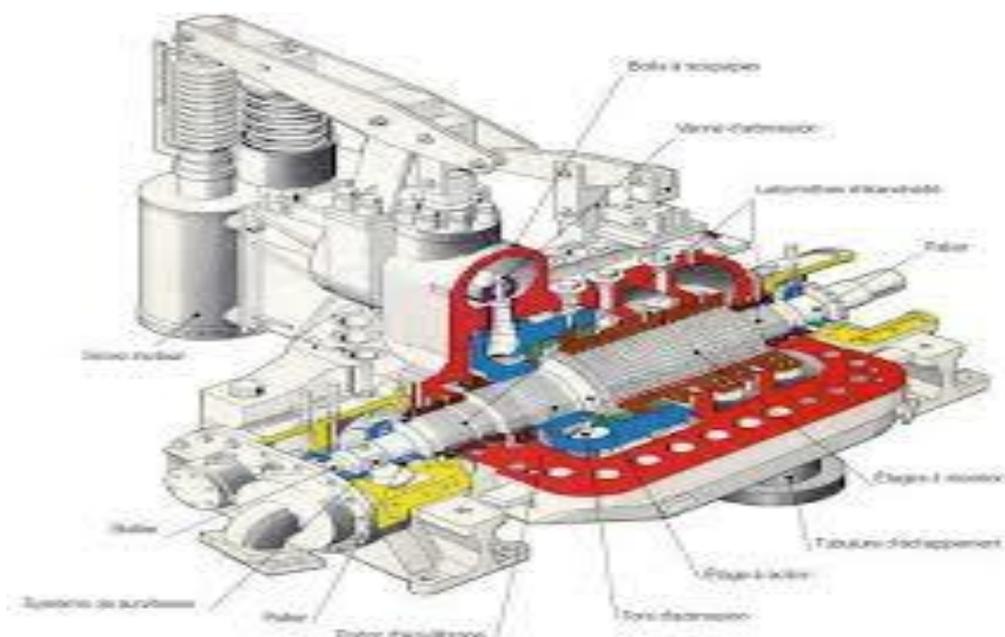


Figure I.3 : turbine à vapeur à réaction.

## Chapitre 2 | Généralité turbine de vapeur

### I.1.7. Classification des turbines à vapeur

On a plusieurs critères pour la classification de la turbine à vapeur [6] :

#### I.1.7.1. selon l'utilisation

##### A. Turbine à condensation :

Dans laquelle la pression de la vapeur à la sortie est très proche de vide (0,03 à 0,055bars) cette pression correspond à la température de la vapeur saturée à la sortie de la turbine et elle dépend de la température de l'eau froide qui passe par le condenseur. Les turbines à condensation sont utilisées pour la fabrication simultanée de l'énergie électrique et de la chaleur par exemple pour le chauffage urbain elle entraîne les bateaux, les turbocompresseurs et les turbosoufflantes.

##### B. Turbine à contre pression :

Dans laquelle la pression à la sortie est bien supérieur à la pression atmosphérique, produise de l'électricité, et la vapeur d'échappement est utilisée pour les différentes lignes technologiques (fabriques de papier, textiles...etc.).

#### I.1.7.2. Selon la forme de la veine de vapeur :

##### A. Turbine axiale :

L'écoulement de la vapeur se fait selon un cône ayant même axe que la turbine c'est les turbines les plus utilisées.

##### B. Turbine radiale :

L'écoulement de la vapeur se fait dans toutes les directions perpendiculaires à l'axe de la turbine.

#### I.1.7.3. Par le nombre d'étages de rotor :

- Turbine élémentaire ou à une seule roue ou mono étagée.
- Turbines à éléments multiples ou à plusieurs roues ou multi étagée.

#### I.1.7.4. Par le mode d'action

##### A. Turbine à action :

Dans laquelle la transformation thermodynamique (la détente) se fait uniquement dans les canaux fixes, les canaux mobiles jouent le rôle de transformer l'énergie cinétique acquise par la détente en travail mécanique communiqué au rotor.

## Chapitre 2 | Généralité turbine de vapeur

### **B. Turbine à réaction :**

Dans laquelle la détente se fait dans les canaux fixes et les canaux mobiles, Le rotor se présente en générale sous la forme d'un tambour sur lequel sont fixées les aubes mobiles. Généralement, les derniers étages de la turbine multicellulaire à action sont à réaction.

### **I.1.7.5. selon le mode de construction :**

#### **A. turbine à un corps :**

Est construite pour des puissances faibles ou moyennes jusqu'à 20 MW.

#### **B. turbine à plusieurs corps :**

Ou de grande puissance pour les centrales thermiques à puissance élevée elle comprend deux ou trois corps (haute pression (HP), moyenne pression (MP), basse pression (BP)).

Les turbines à vapeur modernes sont toutes axiales, multi étagées (à l'exception de celles entraînant de petites machines auxiliaires).

### **I.1.8. Comparaison avec la turbine à gaz :**

Nous allons faire dans cette partie une comparaison entre la turbine à gaz (TAG) et la turbine à vapeur (TAV) de point de vue thermodynamique et construction technologique [4].

#### **I.1.8.1. Comparaison de point de vue thermodynamique :**

Lorsque le rôle du fluide moteur est joué par une vapeur qui, après sa détente, se dirige dans un condenseur, ce fluide retourne à la source chaude sous forme liquide, et sa compression jusqu'à une pression supérieure au cycle n'absorbe qu'une fraction peu importante du travail fourni par la détente. Ainsi, dans le cas de la vapeur d'eau, la puissance absorbée par la pompe d'alimentation, le ventilateur et le turbocompresseur est de l'ordre de 6 à 9% de la puissance développée par la turbine. Il n'en est pas de même lors que le fluide moteur est un gaz permanent ; celui-ci doit être comprimé à l'état gazeux par un compresseur, qui est l'un des principaux organes de cette installation.

La variation du rendement de la TAG entraîne des répercussions beaucoup plus importantes que dans le cas d'une turbine à vapeur où la puissance utile ne diffère que de quelque centième de la puissance fournie par la détente. De même, le rendement du compresseur joue un rôle plus grand que celui de la pompe d'alimentation de la turbine à vapeur.

La substitution d'un gaz permanent à un fluide condensable présente encore un autre aspect ; dans le cas de l'eau, toute la chaleur latente qui reste à la fin de la détente est transmise à l'eau dans le condenseur. Elle est ainsi définitivement perdue. Pour réduire cette perte, on

## Chapitre 2 | Généralité turbine de vapeur

munit la turbine de soutirage de vapeur alimentant des réchauffeurs d'eau d'alimentation. La chaleur latente de la vapeur soutirée est ainsi réintroduite dans le cycle thermodynamique, et le rendement se trouve ainsi amélioré. Mais même dans des conditions idéales (nombres de soutirages infini, réchauffage de l'eau jusqu'à l'ébullition), seule une fraction de la chaleur de la vapeur peut être réintroduite dans le cycle, le reste devrait nécessairement être cédé à la source froide. Au contraire, dans le cas de la TAG, le fluide sortant de la turbine à gaz ne contient que de la chaleur sensible ; ce n'est pas seulement une partie mais, la totalité de cette chaleur qui peut être introduite dans le cycle.

Cela ne veut pas dire qu'une telle turbine à gaz fonctionne sans source froide ; mais contrairement à ce qui au lieu pour une turbine à gaz à cycle simple, le rôle de la source froide est joué, non pas par l'atmosphère, mais par l'eau de réfrigération du compresseur, lequel, dans ce cas particulier doit réaliser une compression adiabatique.

La différence de température et pression maximale, puissance générée et rendement entre la turbine à gaz et celle à vapeur sont résumées dans le tableau suivant [3] :

	<b>T. Max (°C)</b>	<b>P. Max (bar)</b>	<b>Puissance(MW)</b>
<b>Turbine à gaz</b>	1300	12	Jusqu'à 300
<b>Turbine à vapeur</b>	550	65	Jusqu'à 1400

**Tableau I.1 : comparaison entre turbine à gaz et turbine à vapeur(T,P et Pu).**

### I.1.8.2. Comparaison de point de vue technologique :

Les turbine à gaz diffèrent des turbines à vapeur par :

- la pression de fluide utilise, beaucoup plus basses.
- Les températures plus élevées.

Le premier point est favorable pour la construction, les parois sont plus minces et les pièces moins lourdes d'où :

- plus grande facilité de réalisation.
- diminution de prix de matériaux identiques.
- souplesse plus grande des tuyauteries leur permettent de s'adopter aux dilatations sans efforts excessifs sur les machines.
- limitation des contraintes thermiques transitoires donc possibilité d'une montée de température rapide, qualité particulièrement appréciée pour les groupes de pointe.

## Chapitre 2 | Généralité turbine de vapeur

Ainsi lorsque l'énergie mécanique est produite à l'aide d'une turbine à vapeur, les produits de la combustion ne décrivent pas un cycle thermodynamique, il ne fournit pas directement de travail, mais après avoir cédé la plus grande parties de leur chaleur à l'eau et sa vapeur, sont rejetés à l'atmosphère où ils se refroidissent jusqu'à la température ambiante. Cette transmission de la chaleur des gaz au fluide moteur est réalisée à l'aide des échangeurs constitués par les tubes de la chaudière, de la surchauffeur de vapeur et de l'économiseur. La présence de tous ces

Échangeurs augmente notablement l'encombrement et le prix de l'installation.

	<b>Turbine à vapeur</b>	<b>Turbine à vapeur</b>
<b>Turbine à vapeur</b>	<p style="text-align: center;"><b><u>Tuyères :</u></b></p> <p>1- acier au Mn(C 0,35 ; Mn 2%).                  2- acier au Cr Mo Cr (C 0,2 ; Cr13 ; M 0,1).                  3- acier au Cr Ni W (Cr 18 inoxydable).                  4- acier à 14% de Cr.</p> <p style="text-align: center;"><b><u>Rotors et disques :</u></b></p> <p>Acier qui contient généralement 1,5% de Cr ; 0,4% de Mo ; 1% de Mn</p>	<p style="text-align: center;"><b><u>Aubes mobiles :</u></b></p> <p>1. Super alliages à base de nickel renforcés par durcissement et traitement thermiques. GTD-111,                  2. les éléments critiques (Cr, Mo, Co, Al, W et Ta)</p> <p style="text-align: center;"><b><u>Les étages :</u></b></p> <p>ailettage à base de cobalt GTD222</p>
<b>Encombrement :</b>	Elle comporte une chaudière, un condenseur, turbopompe alimentaire et d'extraction, ainsi qu'un dégazeur.	Un seul compartiment qui contient toutes les éléments.
<b>Démarrage :</b>	Il nous faut au moins 1heure 30minute pour la démarrer. Sans tenir compte le temps de démarrage de la chaudière.	Démarrage rapide 9 minutes, démarrage normal 21 minute.

**Tableau I.2 : comparaison entre turbine à gaz et turbine à vapeur (Matériaux et fonctionnement).**

### I.2. Cycle des installations motrices à vapeur :

#### I.2.1. Principe d'une installation motrice à vapeur :

Les installations motrices à vapeur (IMV) sont des moteurs à apport externe de chaleur qui fonctionnent de manière cyclique, le fluide échangeant de la chaleur avec une source froide, en général le milieu ambiant (air ou eau), et une source chaude constituée par des fumées issues d'une combustion ou un fluide chauffé par une réaction nucléaire. Ce sont des machines à flux continu dont le fluide, très généralement de l'eau qui est un fluide idéal car il est bien adapté sur le plan thermodynamique et intéressant sur le plan économique. Il subit une évolution thermodynamique cyclique en traversant un minimum de quatre composants.

- un générateur de vapeur (GV) dans lequel l'eau est vaporisée en recevant de la chaleur de façon isobare. Il passe de l'état 4 à l'état 1. Dans les installations à combustion, pour des raisons liées aux transferts thermiques.

- une turbine (T) dans laquelle la vapeur se détend, de la haute pression à la basse pression (1-2) de façon adiabatique, en fournissant le travail moteur sur l'arbre. Après détente, la vapeur rejoint un condenseur.

- un condenseur où elle se condense (2-3) de façon isobare par échange thermique avec un fluide froid. Elle atteint ensuite une pompe.

- une pompe chargée de remettre l'eau sous forte pression (3-4) de façon adiabatique. Ce composant consomme de la puissance pour la communiquer au fluide. L'eau sous pression rejoint dans le générateur de vapeur.

Les transformations faites au niveau du GV et du condenseur sont communes à tous les échangeurs de chaleur. L'hypothèse d'adiabaticité pour les deux machines est aussi justifiée par comparaison avec les quantités de chaleur mises en jeu dans les deux échangeurs.

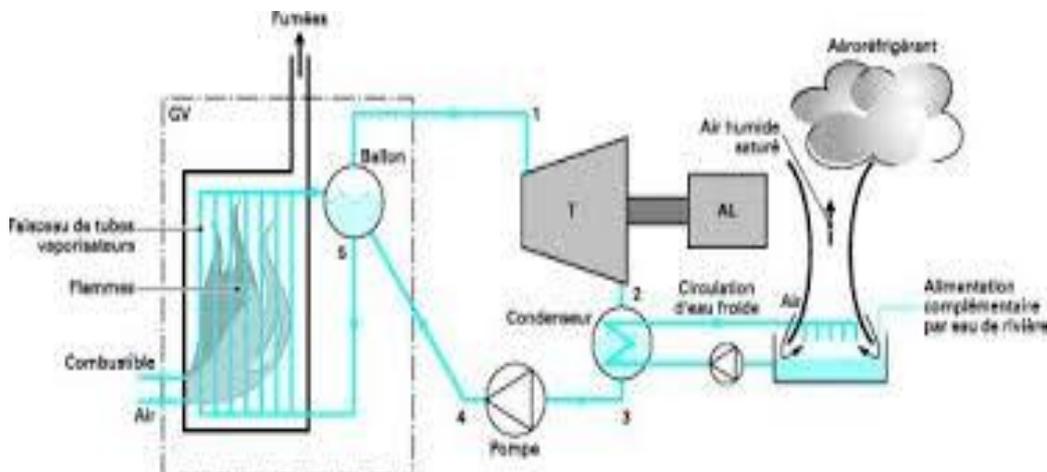


Figure I.4 : Représentation schématique d'une installation motrice à vapeur.

**I.2.2. Cycle de Carnot :**

L'avantage des machines frigorifiques ou des pompes à chaleur à vapeur par rapport aux machines à gaz du fait de la possibilité dans ces machines de réaliser des échanges thermiques avec les sources chaude et froide à la fois isobares et isothermes, l'isothermicité des échanges avec les sources est une condition nécessaire au fonctionnement d'une machine de Carnot dont l'efficacité est maximale. Le cycle de Carnot est composé de deux isothermes 4-1 et 2-3 qui correspondent respectivement aux échanges thermiques avec les sources chaude (GV) et froide (condenseur) et deux isentropiques, l'une pour la compression adiabatique réversible dans la pompe 3-4, l'autre pour la détente adiabatique réversible dans la turbine 1-2, voir (figure I.5)

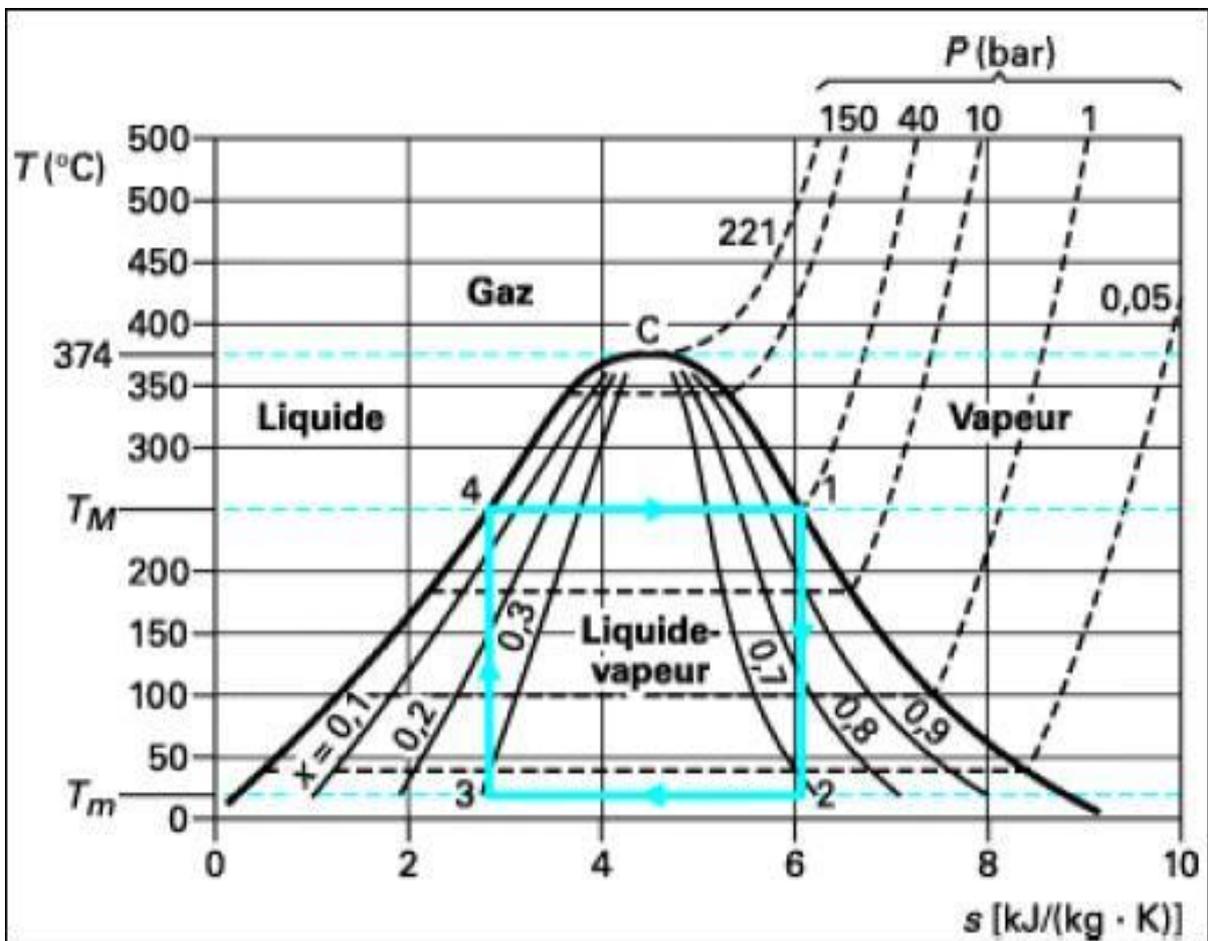


Figure I.5 : cycle de Carnot dans le Diagramme entropique(T, S).

## Chapitre 2 | Généralité turbine de vapeur

Le rendement d'une machine fonctionnant selon ce cycle est le rendement de Carnot donné par :

$$\eta_{th} = \frac{W_{t12} - W_{t34}}{q_{41}} = \frac{t_M - t_m}{t_M}$$

Avec  $T_M$  et  $T_m$  respectivement, les températures des sources chaude et froide égales, dans un cycle de Carnot, aux températures maximale et minimale du cycle, la valeur maximale du rendement théorique de cycle de Carnot atteint 60%.

### I.2.3. Cycle de Rankine et cycle de Hirn :

#### I.2.3.1. Description

Dans le cycle de Carnot en particulier, il n'est pas envisageable de pratiquer une compression sur un fluide diphasique (mélange liquide-vapeur), dans une pompe. Pour éviter cette situation, on est conduit à prolonger la condensation 2-3 jusqu'à obtenir le liquide seul (figure 8). Le pompage a lieu alors dans la zone du liquide selon la transformation 3-4 et le liquide est envoyé dans le ballon. Le cycle ainsi obtenu est le cycle de Rankine, utilisé couramment dans les petites installations de l'ordre de quelques centaines de kilowatts à quelques mégawatts et pour des pressions maximales inférieures à 50 bars.

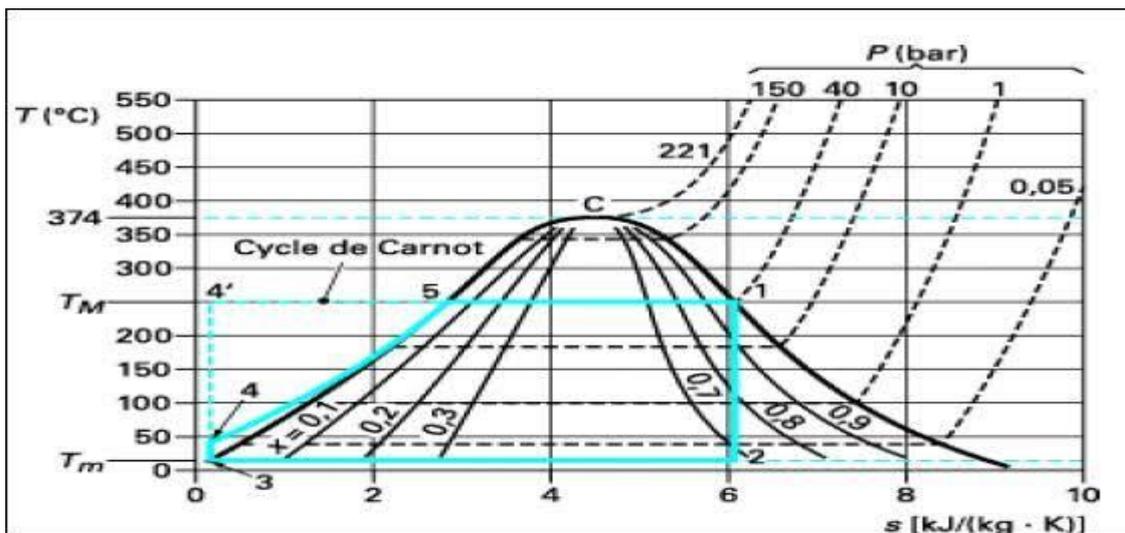


Figure I.6 : Cycle de Rankine d'une IMV et cycle de Carnot associé pour l'eau.

## Chapitre 2 | Généralité turbine de vapeur

La comparaison des aires de ce cycle et de celle du cycle de Carnot associé (mêmes températures extrêmes) met en évidence la perte du rendement du cycle de Rankine par rapport à celui du cycle de Carnot, voir (figure I.6)

Dans un fonctionnement selon un cycle de Rankine, la détente du fluide à lieu dans la zone diphasique, Une telle situation est dommageable pour le fonctionnement de la turbine (l'humidité entraîne l'érosion de la turbine).

Afin d'éviter cette situation, on pratique une surchauffe (6-1) de la vapeur à la sortie du ballon dans le GV avant qu'elle ne pénètre dans la turbine. Il faut que la surchauffe soit suffisante pour que la majeure partie de la détente ait lieu dans la zone de vapeur surchauffée. En pratique cette surchauffe est limitée par le niveau maximal de température admissible (jusqu'à 600°C) dans les installations classiques, ce qui permet d'utiliser des matériaux peu onéreux). Ce fonctionnement utilisé dans les IMV de puissance moyenne (5 à 20 MW), correspond au cycle de Hirn (figure 7).

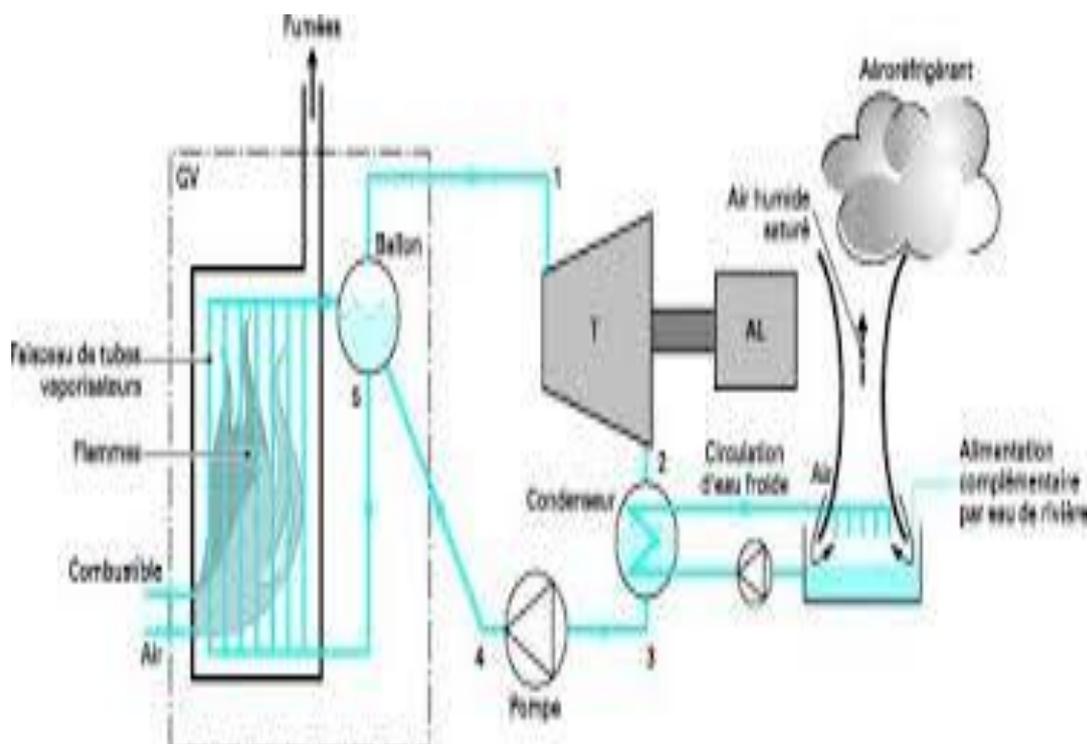


Figure I.7 : installation motrice à vapeur fonctionnant sur la base d'un cycle de Hirn.

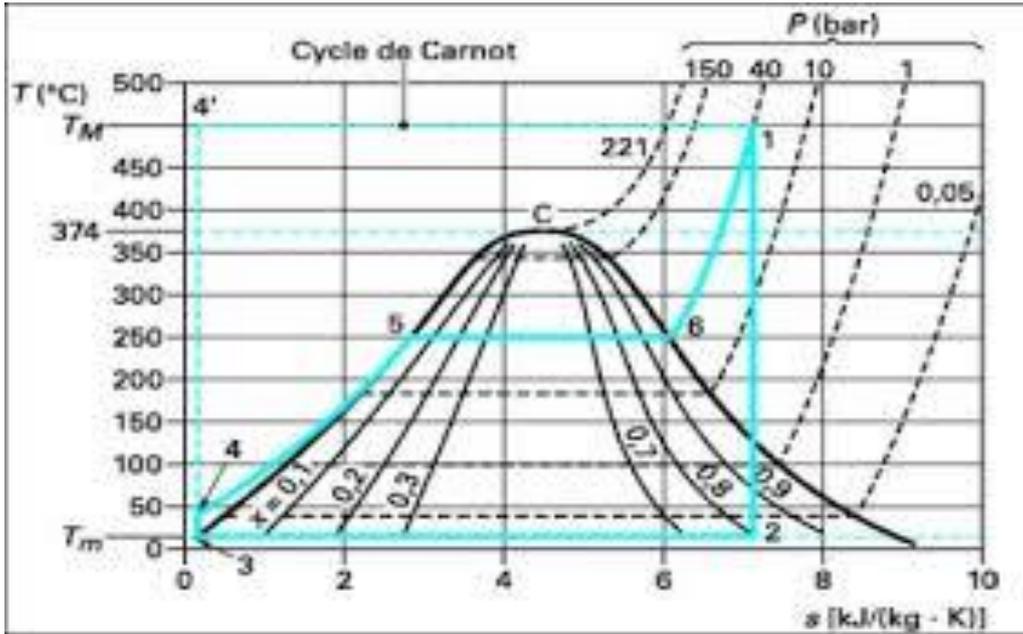


Figure I.8 : Cycle de Hirn et cycle de Carnot associé pour l'eau

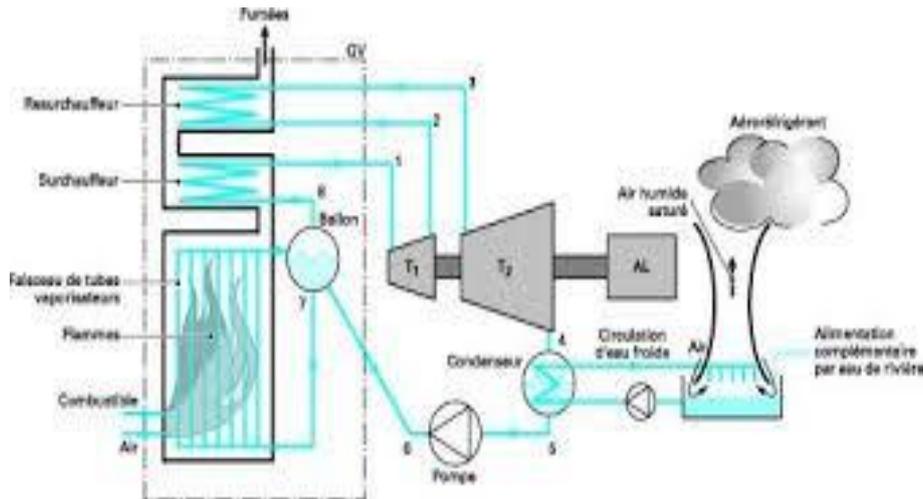
### I.2.3.2. Expressions du rendement théorique :

Pour ce type de cycles, le rendement théorique  $\eta_{th}$  est calculé à partir des valeurs des enthalpies massiques  $h$  de l'eau aux divers points caractéristiques du cycle (fig. II.5). Ainsi, on notera que :

$$\eta_{th} = \frac{W_{t12} - W_{t34}}{q_{41}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)}$$

En procédant comme précédemment avec le cycle de Rankine, on constate que le cycle de Hirn a un rendement nettement plus faible que celui d'un moteur de Carnot fonctionnant entre les mêmes températures extrêmes. L'écart est d'ailleurs plus important que dans le cas d'un cycle de Rankine. Il ne faut cependant pas en conclure que le rendement d'une IMV fonctionnant selon le cycle de Hirn est inférieur à celui d'une IMV fonctionnant selon le cycle de Rankine car les températures maximales  $T_M$  sont différentes pour des pressions maximales de cycle identiques, le rendement théorique de cycle de Hirn est d'environ de 42%.

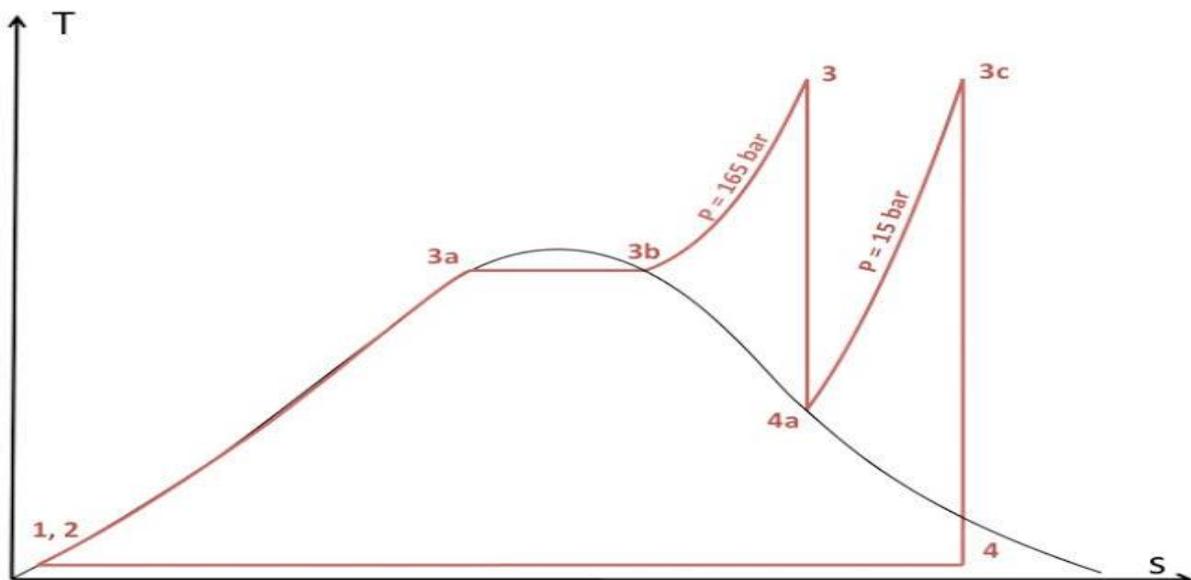
### I.2.4. Cycle de Hirn avec resurchauffe :



**Figure I.9 : Schéma d'une IMV fonctionnant sur la base d'un cycle de Hirn avec surchauffe**

Dans le cycle de Hirn (figure 10) on note que la détente réversible jusqu'à la température ambiante (du condenseur) conduirait à obtenir de la vapeur humide contenant près de 30 % de liquide environs, pour éviter ça la détente est alors faite en deux te

- une première détente 1-2 est réalisée dans le domaine de la vapeur surchauffée.
- la deuxième partie de la détente 3-4 a lieu après une nouvelle surchauffe 2-3 de la vapeur.
- La deuxième surchauffe est faite en général jusqu'à la même température que celle de fin de première surchauffe. La détente totale à lieu dans le domaine de la vapeur sèche (surchauffée) ce qui est favorable au fonctionnement de la turbine.



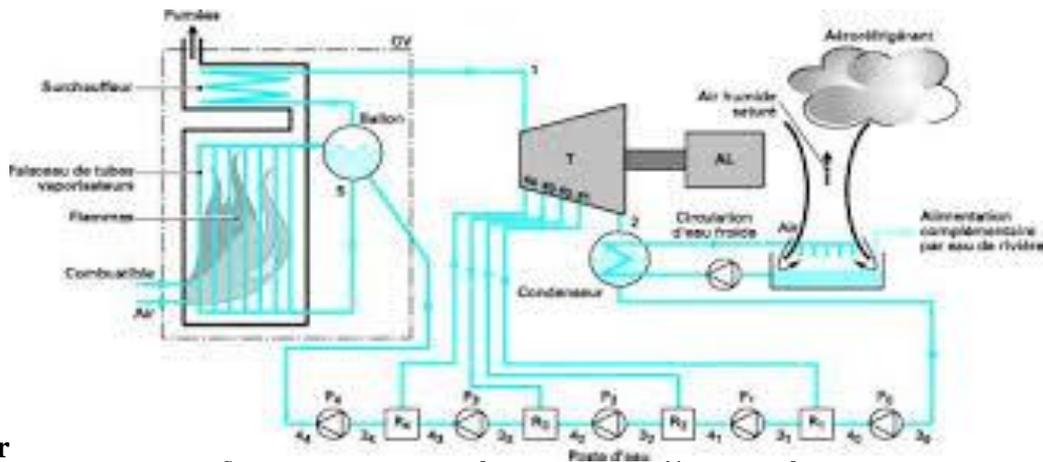
**Figure I.10 : Cycle de Hirn à resurchauffe.**

## Chapitre 2 | Généralité turbine de vapeur

$$\eta_{th} = \frac{-W_{t12} + W_{t34} + W_{t56}}{q_{61} + q_{23}} = \frac{-Dh_{12} + Dh_{34} + Dh_{56}}{Dh_{61} + Dh_{23}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_3 - h_4)}{(h_1 - h_5) + (h_3 - h_2)}$$

Le rendement théorique de ce cycle peut arriver à 46%.

### I.2.5. cycle de Hirn avec soutirage de vapeur :



Figur

Le rendement d'un cycle pouvait être amélioré en utilisant la chaleur contenue dans le fluide au cours de son refroidissement ou de sa détente pour réchauffer le fluide lors d'une autre étape de son évolution ; voir (figure I.11), C'est le principe utilisé dans les cycles à rendement maximal.

Ce principe et donc améliorer le rendement des IMV. C'est la pratique des soutirages de vapeur réalisés sur la ligne de détente du fluide dans la turbine pour préchauffer l'eau liquide avant son entrée dans le GV.

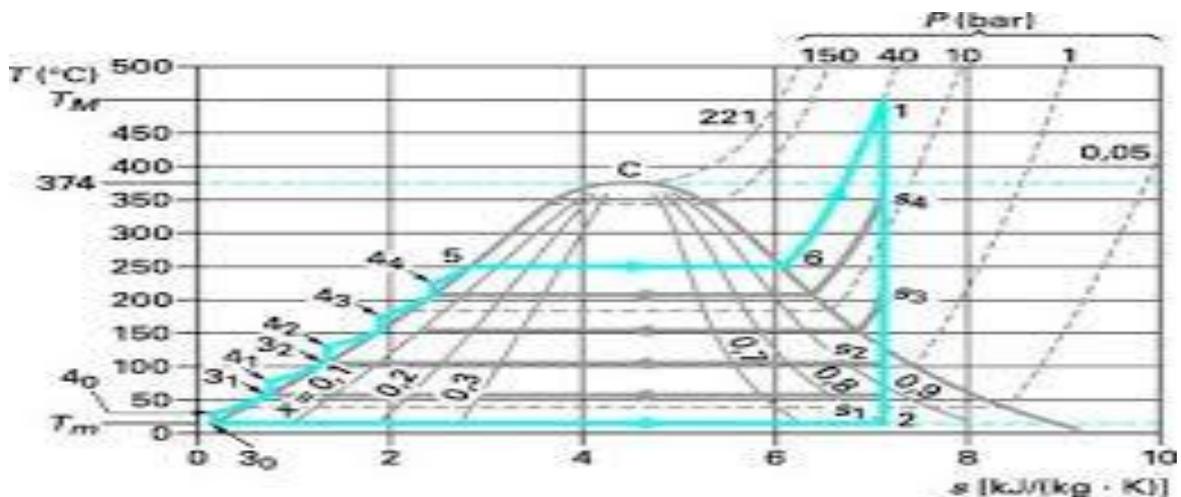


Figure I.12 : Cycle de Hirn avec soutirages de vapeur.

## Chapitre 2 | Généralité turbine de vapeur

Le réchauffage de l'eau est réalisé par la vapeur soutirée, C'est un réchauffage gratuit. En réalité ce réchauffage se par une production moindre d'énergie mécanique sur l'arbre de la turbine. En notant par  $\dot{m}_i$  les débits massiques dans chacun des soutirages (si), et par  $\dot{m}$  le débit qui traverse le générateur de vapeur, les puissances thermiques et mécaniques mises en jeu sont données par :

$$q = \dot{m}(h_1 - h_2) - \sum_{i=1}^n \dot{m}_i (h_{si} - h_2)$$

$$\eta_{th} = \frac{w_t}{q} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_2) - \sum_{i=1}^n \dot{m}_i (h_{si} - h_2)}{\dot{m}(h_1 - h_2)}$$

Le rendement d'un cycle à soutirage est bien, comme il fallait s'y attendre, supérieur à celui du cycle sans soutirage. L'amélioration est d'autant plus sensible que le nombre de soutirages est plus élevé. En pratique compte tenu du surcoût d'investissement que représente cette technologie, le nombre de soutirages est limité à un ou deux soutirages pour les IMV de moyenne puissance (de l'ordre de 50 MW). Il est de six à neuf soutirages pour les installations de forte puissance (250 à 1 300 MW).

### I.2.6. Cycle supercritique :

Pour augmenter significativement ce rendement, il est possible d'utiliser des cycles dits supercritique en ce sens que la pression de Léau dépasse la pression critique de 221,2.

Il est en résulte bien évidemment des contraintes beaucoup plus fortes au niveau des tubes de la chaudière. Les progrès réalisés sur la résistance au fluage des tubes permettent de trouver des solutions technologiques inenvisageables il y a peu de temps.

A titre exemple ,l'épaisseur de tuyau nécessaire pour résister a une pression de 225 bars et une température de 600C° passe de 250 mm avec de l'acier P22 a 2,25% de Cr , a 93 mm avec de l'acier P91 a 9% dz Cr , et a 68 mm avec de l'acier HCM12A a 12% de Cr[JAYET-Gendrot et al, 1999].

Une autre contrainte rencontrée par les chaudières supercritique est la suivante : du fait de l'absence de vaporiseur, on ne peut plus refroidir le foyer par des tubes écrans parcourus par Léau en ébullition, avec des coefficients d'échange très élevés. On utilise donc une technologie différente, sans ballon séparateur, dans des chaudières dites mono tubulaires (improprement parce qu'en réalité des nappes de tubes sont disposées en parallèle), ou en anglais „Once-through” pour indiquer l'absence de recirculation. Il s'agit de tubes à cannelures internes et ailettes externes, montés en faisceaux en spirale.

## Chapitre 2 | Généralité turbine de vapeur

Les cycles supercritiques ne sont pas une nouveauté (40% des centrales de l'ancienne union soviétique sont supercritique, ainsi que plus de 150 centrales des Etats Unis). L'évolution récente est de rechercher des conditions de sortie chaudière de plus en plus élevées et une double réchauffe.

A titre d'exemple, le projet High performance power système (HIPPS) du département de l'énergie American étudie des cycles pouvant atteindre une pression de 415 bars et une température de plus de 700C°, alors que les réalisations actuelles ne dépassent pas 325bars et 600C°.

Pour fixer les idées, nous avons modélisé dans thermoptim un tel cycle à vapeur supercritique. Le rendement atteint 47,7%(contre environ 40% pour un cycle sous –critique classique analogue).

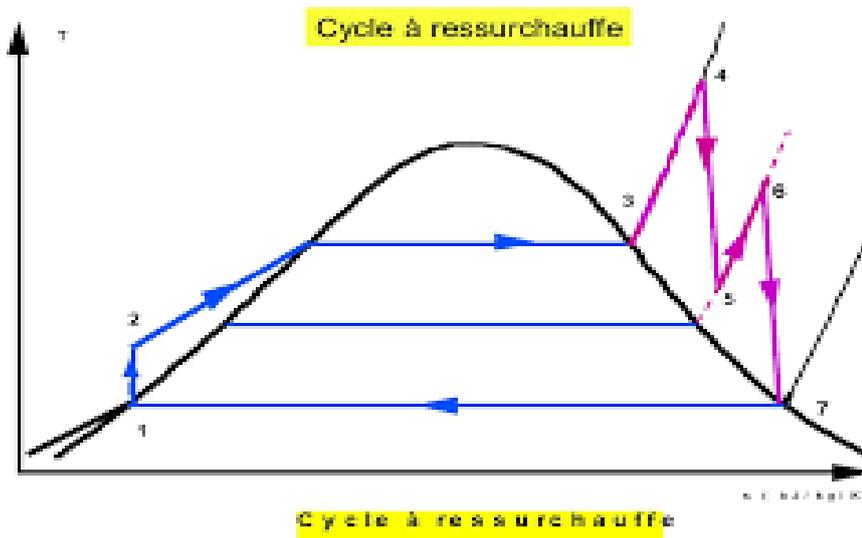


Figure I.13 : IMV à cycle supercritique à deux resurchauffes.

### I.3. Cycle combine gaz –vapeur :

L'utilisation de la turbine à gaz pour la réhabilitation des centrales à cycle de vapeur se limite au développement de certains cycles combinés gaz - vapeur.

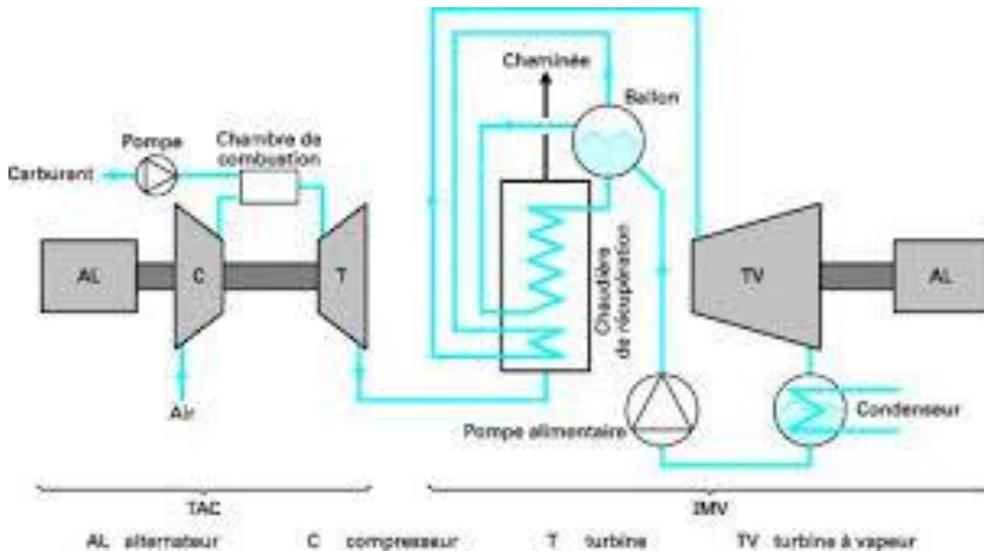
Dans le cas du cycle du gaz, l'extraction du travail peut même commencer à la Température de combustion du mélange combustible. En revanche, l'évacuation de la Chaleur à la source froide se fait à une température bien supérieure à la température ambiante menant à de considérables pertes d'énergie. [1].

## Chapitre 2 | Généralité turbine de vapeur

### I.3.1. principe d'une installation à cycle combiné :

Dans une installation à cycles combinés, le fluide de l'installation motrice à vapeur est chauffé par les gaz d'échappement de la turbine à gaz. Le schéma de principe de l'installation est donné sur la figure (I.14). L'échange thermique entre les gaz de la turbine à gaz et l'eau de la turbine à vapeur a lieu dans un échangeur de chaleur appelé chaudière de récupération qui joue le rôle d'un générateur de vapeur d'une installation motrice à vapeur classique. [3]

Afin de limiter les températures atteintes en fin de combustion dans les turbines à gaz, on réalise la combustion avec un excès d'air. Les gaz d'échappement contiennent alors encore suffisamment d'oxygène pour réaliser, grâce à un apport supplémentaire de carburant, une nouvelle combustion, dite postcombustion, qui augmente la température des gaz et améliore le rendement de l'ensemble à l'image de ce qui se passe dans une turbine à gaz lorsque on effectue une détente réchauffée. En particulier, la postcombustion est intéressante lorsque la turbine à gaz dispose d'un récupérateur de chaleur. Le schéma d'une telle installation est représenté sur la figure (I.14).



**Figure I.14 : Schéma d'une installation à cycles combinés gaz-vapeur.**

Pour analyser ce couplage, on utilise un diagramme température/ puissance thermique échangée (T, Q).

## Chapitre 2 | Généralité turbine de vapeur

### I.3.2. Cycles à un seul niveau de pression :

Dans cette partie, on analyse le couplage d'un cycle de Joule avec un cycle de Hirn. Pour un échange sans pertes dans la chaudière de récupération, la puissance cédée par le gaz doit être égale à la puissance récupérée par l'eau.

Afin de vérifier que la température du gaz reste toujours supérieure à celle de l'eau, le graphique est modifié. On superpose par translation les parties négatives et positives de l'axe des abscisses de manière à faire apparaître le pincement, c'est-à-dire l'écart minimal de température existant entre les deux fluides.

C'est la méthode du pincement qui permet également de mettre en évidence les irréversibilités de l'échange thermique. En effet, la surface située entre les Courbes d'évolution de chacun des fluides est une bonne approximation de la mesure de la production énergétique de l'échangeur.

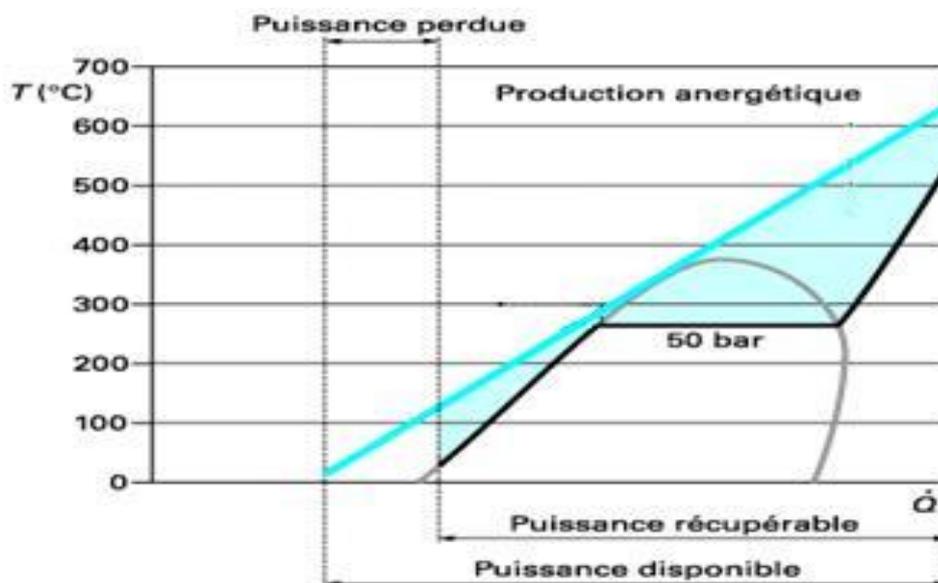
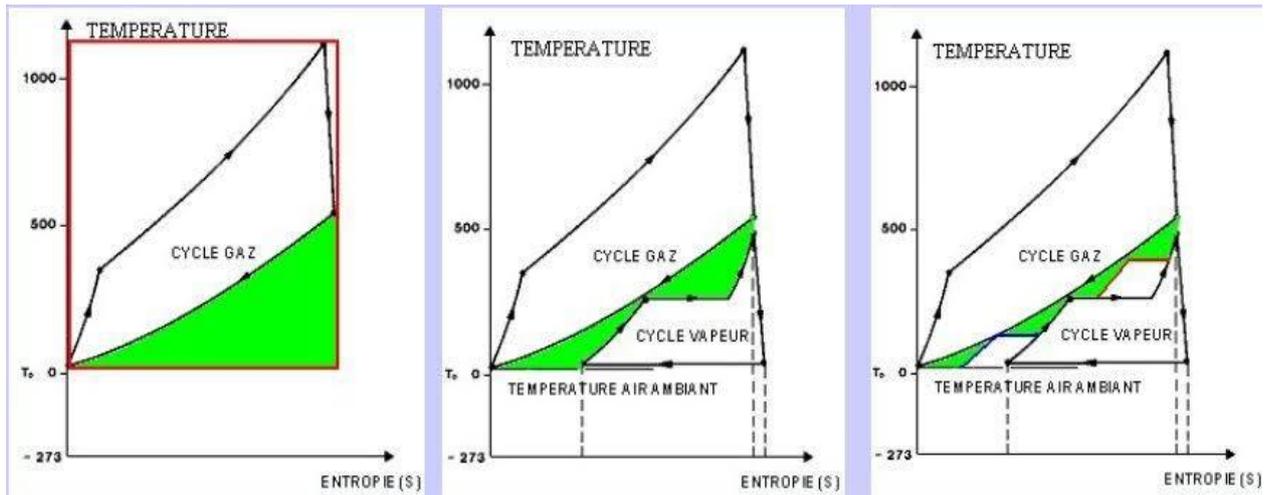


Figure I.15 : Puissance récupéré dans une chaudière de récupération

### I.3.3. Cycle a plusieurs niveaux de pression :

Le couplage avec plusieurs cycles de Hirn à des pressions différentes permet encore de minimiser les irréversibilités des échanges, donc d'améliorer le rendement global de l'installation.



Les trois figures ci- dessous montrent l'intérêt de recourir à plusieurs niveaux de pression : avec certaines hypothèses simplificatrices et un choix judicieux des échelles, on peut superposer dans un diagramme entropique les cycles de la turbine à gaz et de la centrale à vapeur. Dans les trois cas, la surface verte ne produit aucun travail.

### I.3.4. Analyse énergétique du cycle combiné (gaz-vapeur) :

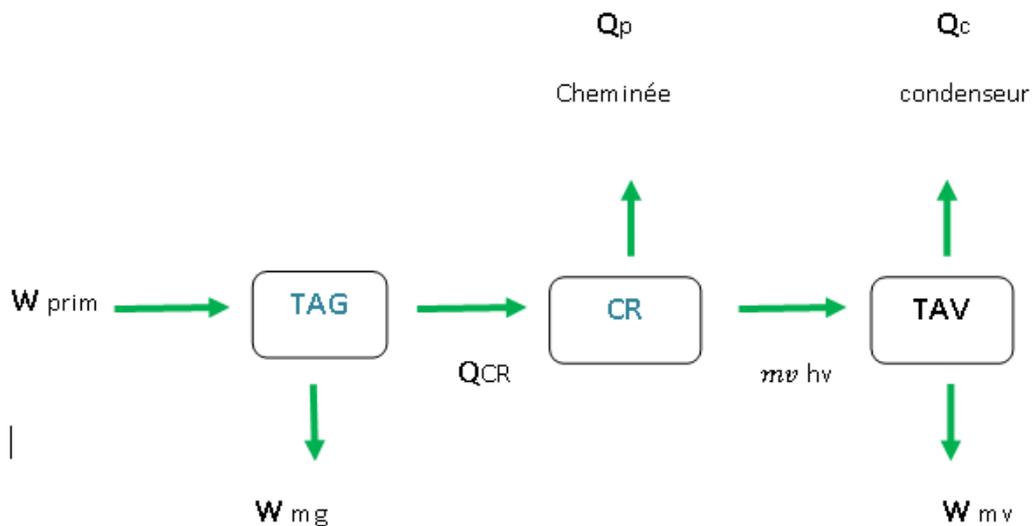


Figure I.16 : Bilans thermique.

## Chapitre 2 | Généralité turbine de vapeur

### A. Bilans thermique :

- Turbine à gaz :  $W_{\text{prim}} = W_{\text{mg}} + Q_{\text{CR}} = W_{\text{mg}} + mgh_4g$
- Chaudière de récupération :  $Q_{\text{CR}} = Q_{\text{P}} + m v h v$
- Turbine à vapeur :  $h v = W_{\text{mv}} + Q_{\text{C}}$

### B. Rendement thermique :

$$\text{Turbine à gaz : } \eta_{\text{tg}} = \frac{W_{\text{mg}}}{W_{\text{prim}}}$$

$$\text{Chaudière de récupération : } \eta_{\text{CR}} = \frac{m v h v}{Q_{\text{CR}}}$$

$$\text{Turbine à vapeur : } \eta_{\text{tv}} = \frac{W_{\text{mv}}}{W_{\text{prim}}}$$

$$\text{Rendement de l'installation : } \quad \eta_{\text{in}} = \frac{W_{\text{mg}} + W_{\text{mv}}}{W_{\text{prim}}}$$

Ordre de grandeurs pratique :

$$\eta_{\text{tg}}=0.38$$

$$\eta_{\text{tv}}=0.40$$

$$\eta_{\text{CR}}=0.85$$

$$\eta_{\text{in}}=54\%$$

### I.4. Capteur cylindro-parabolique :

La technologie des capteurs cylindro-paraboliques est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire. De nombreuses installations ont déjà été testées et commercialisées, dont certaines dans les années 80.

L'installation typique est constituée de trois éléments principaux : le champ solaire, le système de transfert de la chaleur et le système de génération électrique.

Ce type de centrale se compose d'alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques, qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course de soleil.

Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontale, où circule un fluide caloporteur qui servira à transporter la chaleur vers la centrale elle-même.

La température du fluide peut monter jusqu'à 500°C.

Cette énergie est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine qui produit d'électricité.

Certaines centrales sont désormais capables de produire d'électricité en continu, nuit et jour, grâce à un système de stockage de la chaleur.

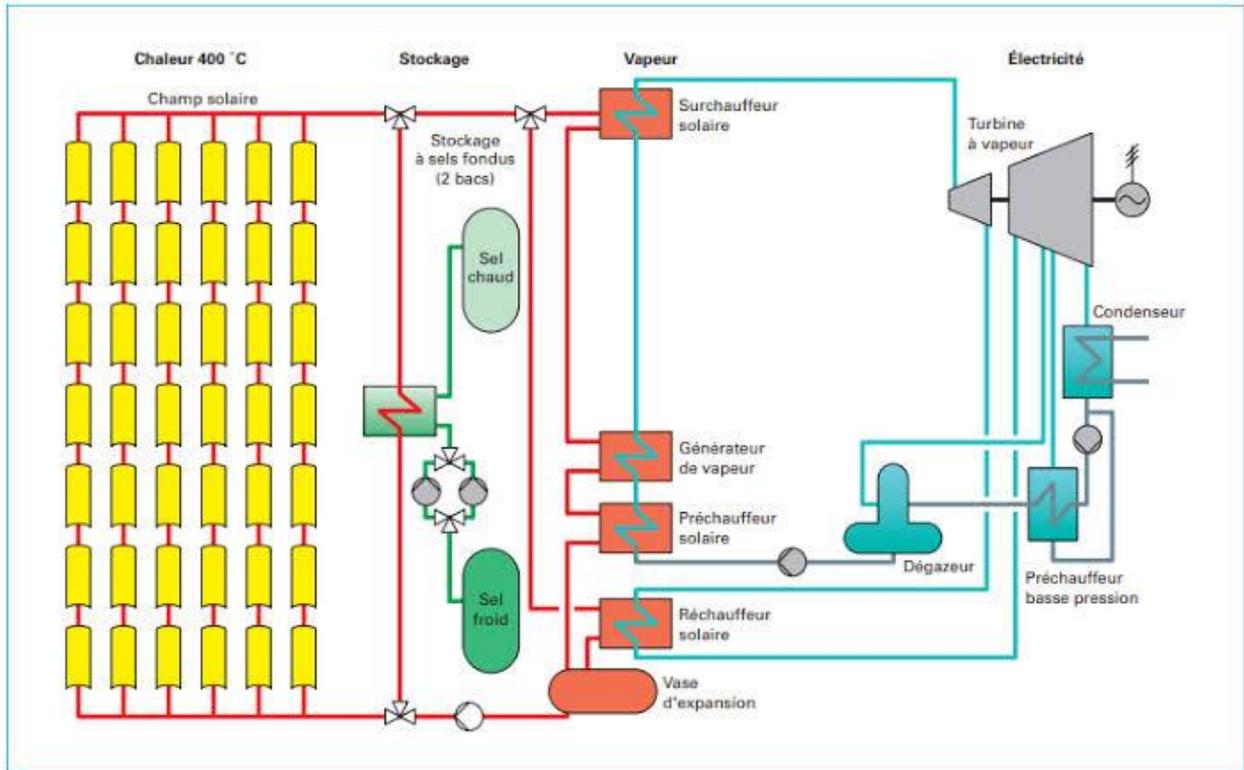


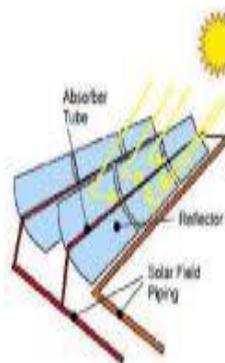
Figure I.17 : Configuration typique d'une centrale à collecteurs cylindro-paraboliques

I.4.1. Le collecteur :

Le collecteur est le composant de base du champ solaire. Il est composé d'un réflecteur parabolique (miroir), d'une structure métallique, d'un tube récepteur et du système de poursuite solaire.

Les miroirs sont composés de verre pauvre en fer, dont la transmissivité atteint 98%. Ce verre est recouvert d'une pellicule d'argent en sa partie inférieure, et d'un enduit spécial de protection. Un Réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97% du rayonnement incident.

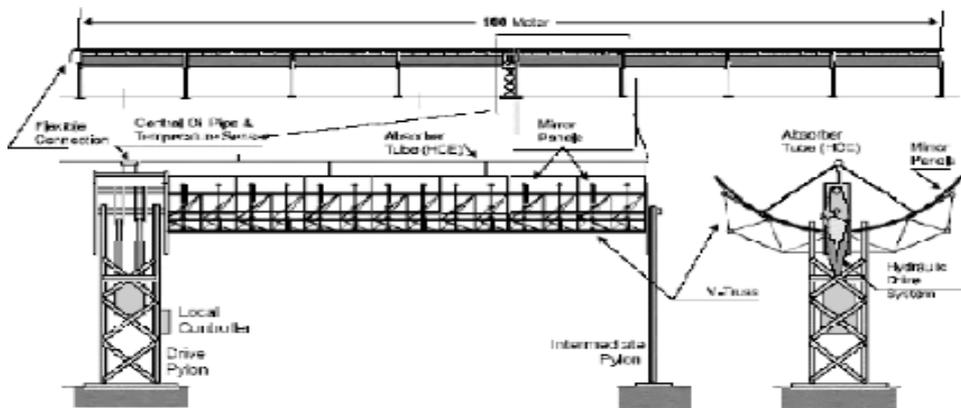
Le facteur de concentration pour un capteur cylindro-parabolique est d'approximativement 80.



**Figure I.18 : Champ de collecteurs**

Le rôle du mécanisme de poursuite est d'adapter l'inclinaison du capteur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au réflecteur. De cette manière, la radiation est réfléchiée au foyer de la parabole et concentrée sur un tube récepteur dans lequel circule le fluide caloporteur.

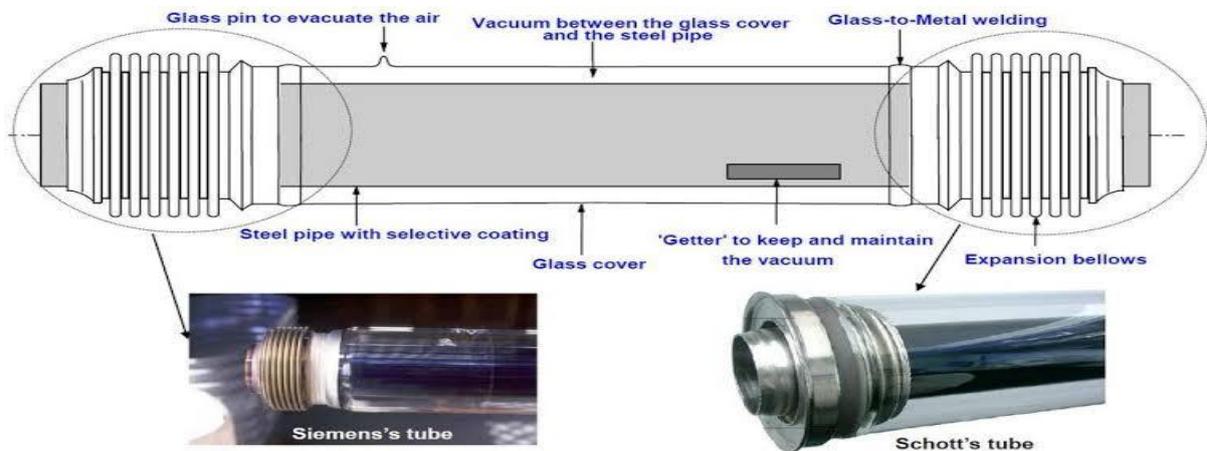
La structure métallique doit suffisamment solide pour résister aux importantes contraintes mécaniques liées au vent. Elle doit de plus être munie d'extrémités assurant la compatibilité entre les dilatations thermiques inégales de l'acier et du verre.



**Figure I.19 : Vue schématique du collecteur cylindro-parabolique.**

Le tube collecteur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Bonne absorption du rayonnement son coefficient d'absorption doit être aussi élevé que possible afin d'éviter toute réflexion du rayonnement incident.
- Pertes thermiques limitées : La température du tube dépassant généralement 400°C, les pertes par échanges convectifs et radiatifs sont très importantes. Afin de les limiter, le tube est entouré d'une enveloppe de verre sous vide [11].



**Figure I.20 : Tube collecteur**

## Chapitre 2 | Généralité turbine de vapeur

### I.4.2. Turbines à gaz :

Une turbine à gaz, ou plus exactement turbine à combustion est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne.

Une telle turbine sert à produire soit du travail, par l'entraînement en rotation d'un arbre lui-même couplé à une machine industrielle ou à une hélice (hélicoptère ou propfan, par exemple), soit une propulsion, par détente des gaz en sortie de turbine dans une tuyère, comme dans un moteur à réaction.

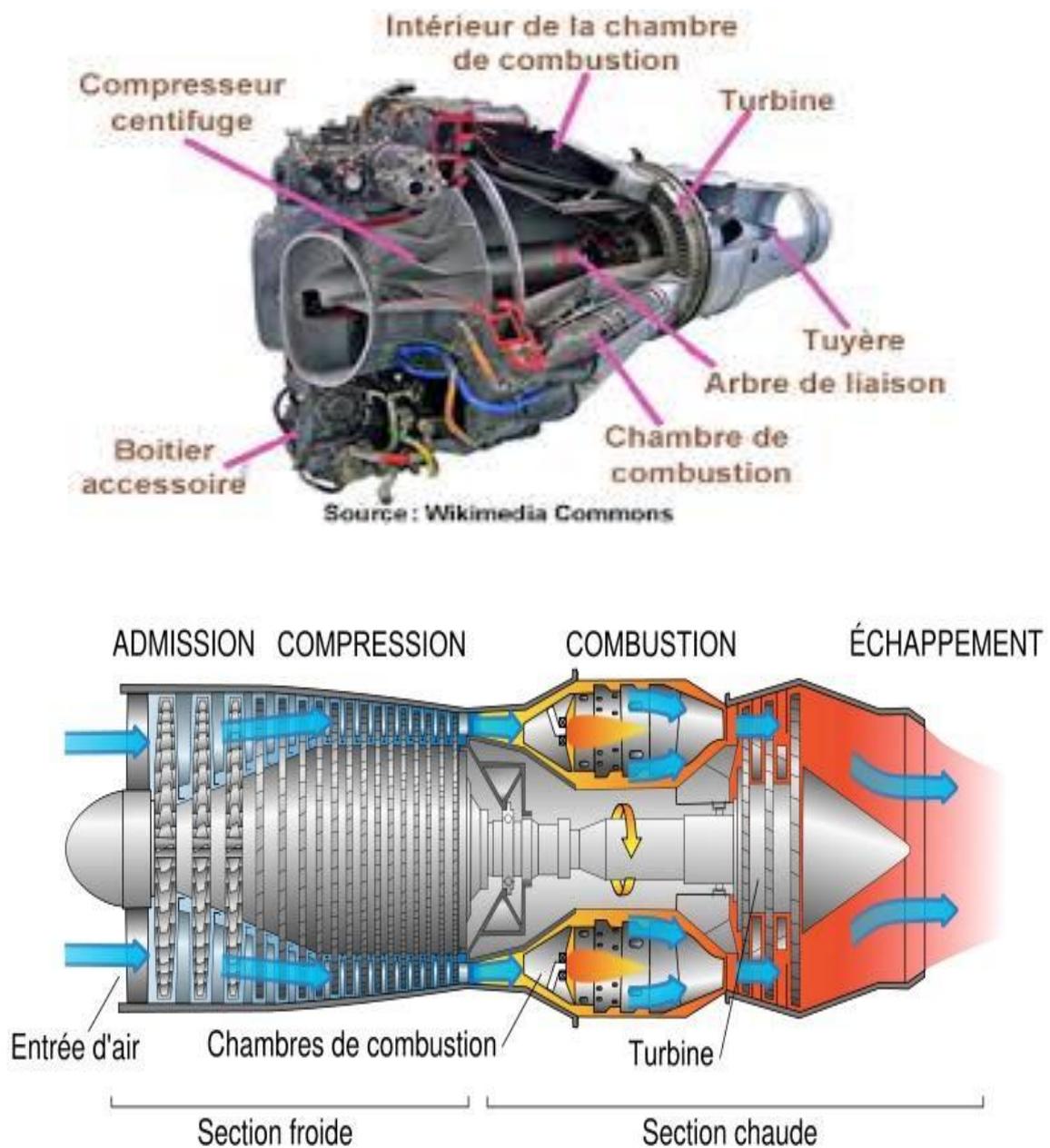


Figure I.21 : Schéma de fonctionnement d'une turbine à gaz à compresseur axial.

# **Chapitre 3**

## **La combustion et le rendement indirect de la chaudière**

## Chapitre 3 | La combustion et le rendement indirect de la chaudière

### 1. Introduction

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

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

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

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

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

### 2. La combustion

Une chaudière est un générateur de chaleur permettant à la fois la production et le transport de l'énergie thermique. La chaudière est l'équipement énergétique incontournable dans tous les secteurs industriels.

L'énergie thermique d'une chaudière est produite soit par une résistance électrique, soit dans un foyer avec un brûleur où une combustion a lieu. Un échangeur de chaleur où un fluide caloporteur récupère l'énergie produite dans le foyer permet ainsi le transport de cette énergie vers le procédé. Cet article s'intéresse uniquement aux chaudières à combustibles, puisqu'elle présente, par rapport aux chaudières électriques, des pertes supplémentaires liées à la combustion et sa qualité.

Pratiquement, le fluide caloporteur ne permet pas de transporter toute l'énergie produite par la combustion dans le foyer de la chaudière. Il y a des pertes énergétiques inévitables qui ne peuvent pas être récupérées. La performance d'une chaudière industrielle est donc définie par la fraction transportable de l'énergie totale produite par la combustion.

## Chapitre 3 | La combustion et le rendement indirect de la chaudière

### 3. Rendement de la chaudière :

Le rendement des chaudières peut être calculé de deux manières : méthode directe et indirecte.

Par méthode indirecte, le rendement est calculé en évaluant 8 pertes d'énergie, et en déduire le rendement. Les 8 pertes énergétiques sont les suivantes :

- 1) Perte d'énergie dans les fumées sèches
- 2) Perte par réchauffement d'humidité du combustible
- 3) Perte par l'énergie de formation de l'eau de combustion d'élément hydrogène des hydrocarbures (d'où la nécessité d'adapter le PCS)
- 4) Perte par réchauffement d'humidité contenue dans l'air de combustion
- 5) Perte par CO imbrûlés
- 6) Perte de l'hydrogène non brûlé
- 7) Perte par radiation et convection
- 8) Perte par purges

Après évaluation de ces 8 pertes énergétiques, le rendement de la chaudière se calcule par la formule suivante :

$$\text{Rendement}_{\text{chaud ind}}(\%) = 100 - 100 * \sum_1^8 \text{Perte}_i$$

La méthode indirecte est plus robuste que la méthode directe parce qu'une erreur sur les appareils de mesure entraîne une variation importante sur le rendement calculé par la méthode directe. L'énergie de la vapeur produite représente généralement 80-90% de l'énergie des combustibles ; une erreur totale de 1% (1 point) sur les appareils de mesure entraîne une variation de 0,9 point sur le rendement par méthode directe, tandis que cette erreur entraîne une variation de 0,1 point sur le rendement par méthode indirecte.

### 4. Les différentes pertes dans la chaudière

Au niveau de la chaudière on retrouve les pertes par :

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

## Chapitre 3 | La combustion et le rendement indirect de la chaudière

### IH.1.1.1. Pertes par chaleur sensible des gaz secs

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

### IH.1.1.2. Pertes par chaleur latente des gaz

Cette perte correspond à la chaleur non dégagée par les imbrûlés gazeux (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) seul l'exploitant peut agir sur cette perte qui ne doit pas exister dans les chaudières bien conduites.

### IH.1.1.3. Pertes par échauffement et vaporisation de l'eau

Cette eau provient

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

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

### IH.1.1.4. Pertes par rayonnement

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

## IH.1.2. Bilan énergétique de la chaudière

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

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

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

## 5. Connaître le rendement énergétique d'une chaudière

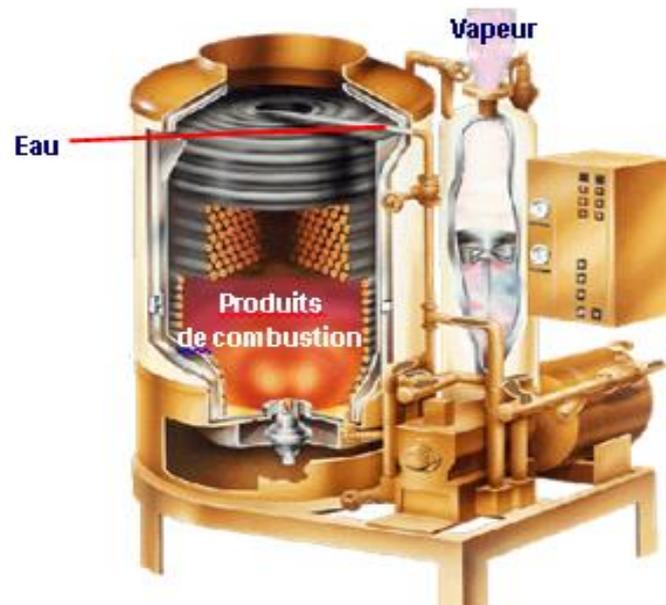
Outre les méthodes de calcul évoqué précédemment, il existe un moyen rapide de connaître le rendement énergétique d'une chaudière avant un achat. Ce moyen est même une obligation légale imposée aux constructeurs de chaudières. Ainsi, tout type de chaudière, ou même d'équipement de chauffe en général, se doit d'être accompagné d'une documentation technique avec son taux de rendement.

## Chapitre 3 | La combustion et le rendement indirect de la chaudière

De plus, les distributeurs de chaudière doivent apposer une étiquette énergie sur chaque modèle de chaudière en vente dans leur réseau commercial. Pour rappel, l'étiquette énergie est une feuille d'information synthétique répertoriant les principales caractéristiques d'un équipement électroménager ou électronique, dont sa puissance calorifique et sa classe énergétique de rendement sur une échelle de A (très économe) à G (très énergivore).

### 6. Les différents types de chaudières :

#### 1. Chaudière à production instantanée

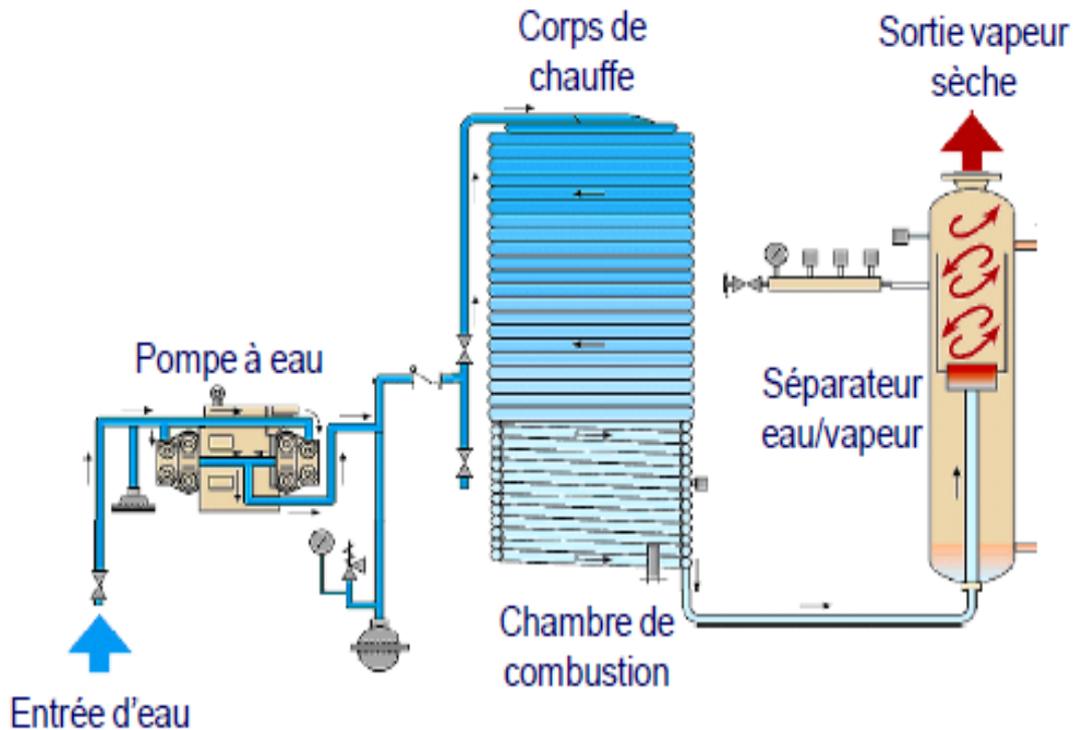


#### Avantages

- Qualité
- Fiabilité
- Sécurité
- Rapidité
- Efficacité
- Rentabilité

Figure 3.1 : Chaudière à production instantanée

### 7. Principe de fonctionnement de la Chaudière à production instantanée :



### 2. Chaudière à tubes de fumée

Historiquement, ce sont les premières machines à vapeur utilisées dans la vieille Industrie, comme c'est le cas pour le chemin de fer ou la navigation. L'appellation "Chaudière à tubes de fumée" est relative aux gaz de fumée qui circulent à l'intérieur. Des tubes de la chaudière contrairement à l'autre type de chaudières à tubes d'eau. Les Gaz, résultants de la combustion dans le foyer, circulent ensuite vers la zone de Convection qui est une série d'échangeurs de chaleur formés par des faisceaux de tubes de faibles diamètres. Les tubes sont immergés dans un volume d'eau stagnant avec lequel se transmet la chaleur. Donc, la température de fumées diminue progressivement avant d'arriver à la cheminée. Les chaudières à tubes de fumées sont habituellement limitées par une pression de 17bars et une charge de 25 tonnes/h [10]. Une pression de 10 bars est très commune pour ces unités. Leur principal usage est dans les petites installations industrielles et pour les applications de chauffage. La figure I.4, montre une chaudière à tubes de fumée à 3 passes.

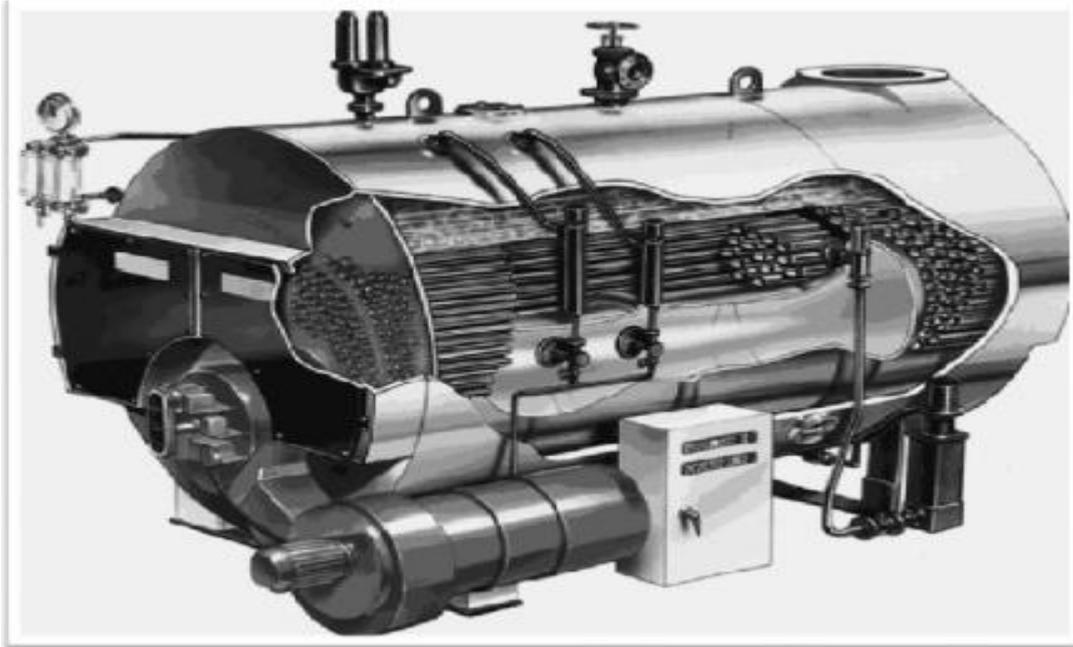


Figure 3.2 : Chaudière à tubes de fumée

8. Principe de fonctionnement de la Chaudière à tubes de fumée :

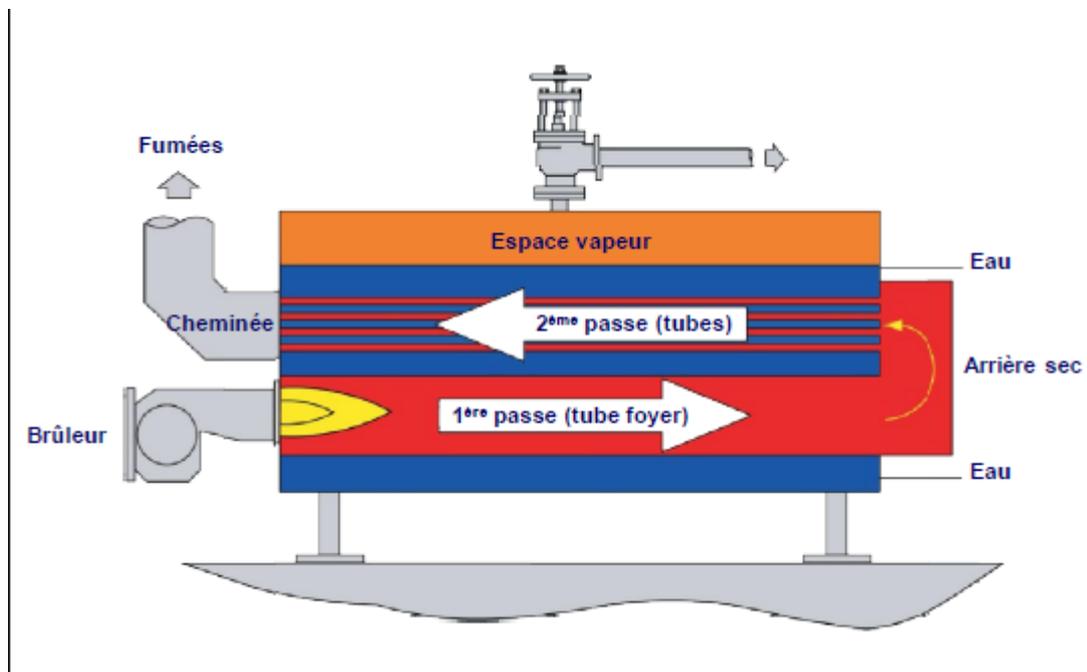


Figure 3.3 : schéma fonctionnement de la Chaudière à tubes de fumée

## Chapitre 3 | La combustion et le rendement indirect de la chaudière

### 3. Chaudière à tubes d'eau

Les chaudières à tubes d'eau ont été développées entre 1958 et 1978, elles sont Destinées à Travailler à des puissances et pressions trop élevées (660 MW et 220 bars). Ce type de chaudière fournit un débit de vapeur supérieur à 20 tonnes/h, en moyenne et haute pression. Il possède deux réservoirs appelés ballon distributeur (en partie Inférieure) et ballon collecteur (ou encore ballon de vaporisation, en partie supérieure), reliés par un faisceau de tubes vaporisateurs.

Dans cet ensemble, circule l'eau qui se Transforme en vapeur. Les gaz chauds produits par la combustion sont directement en Contact avec les tubes vaporisateurs où se produit la vaporisation. La vapeur ainsi Générée est collectée dans le ballon supérieur, l'eau excédentaire est ramenée vers le Ballon inférieur par des tubes de chute non soumis à la chaleur.

Il existe plusieurs types des chaudières à tubes d'eau, distingués selon leur design ou leur utilisation. A titre d'exemple, on peut citer les chaudières (Fig. I.5): type-A, type-O, type-D et ainsi que les chaudières nucléaires.

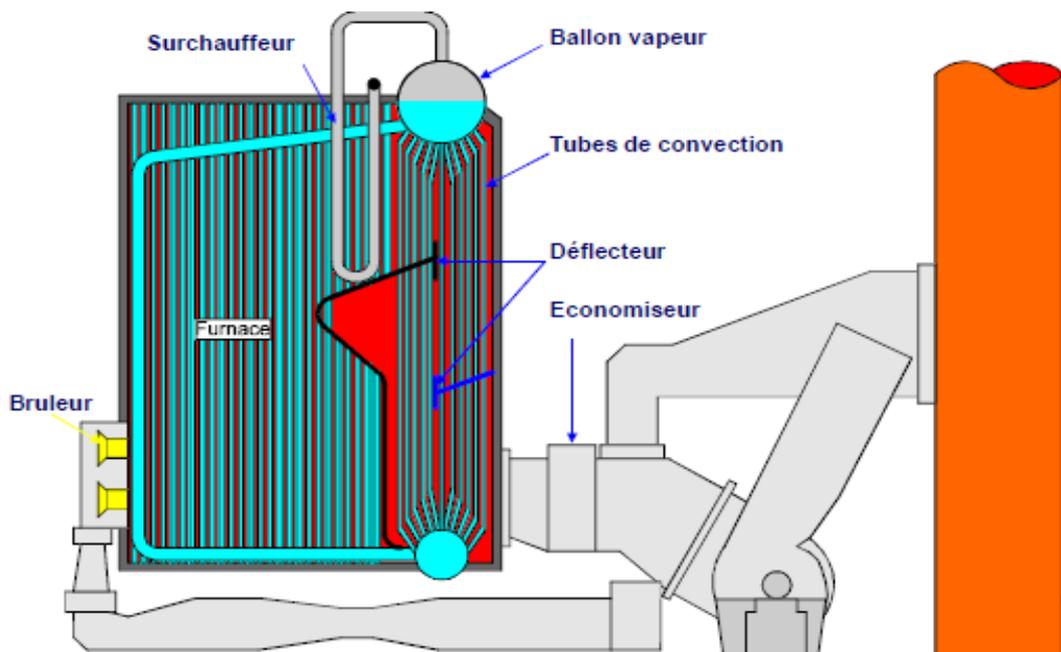


Figure 3.3 : Chaudière à tubes d'eau

### 9. Circulation forcée dans une chaudière à tubes d'eau :

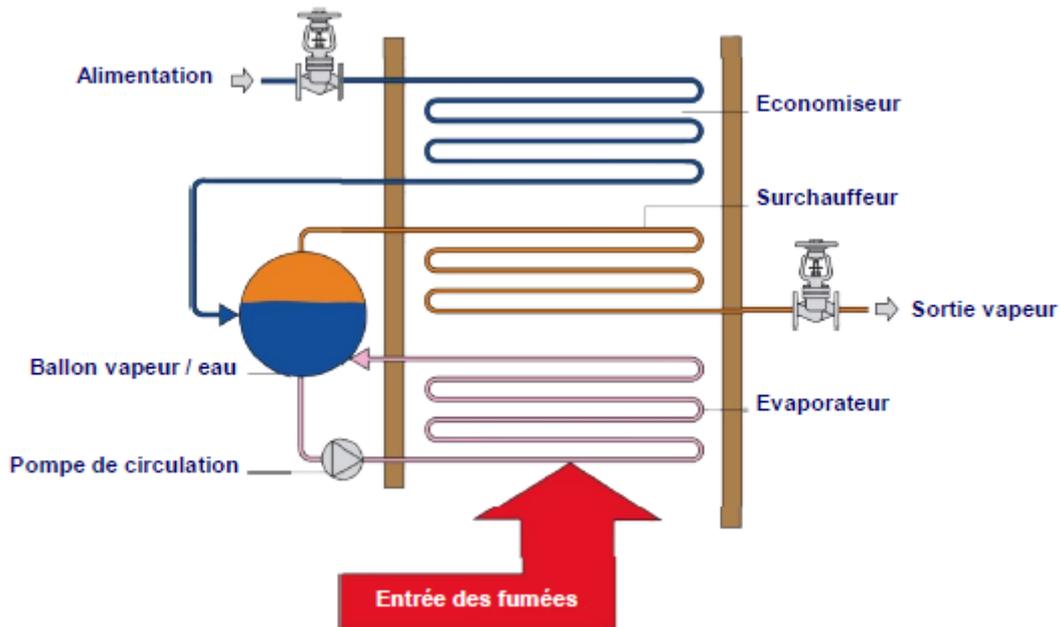


Figure 3.4 : schéma Circulation forcée dans une chaudière à tubes

### 4. Les chaudières/ générateurs :

#### Problématique des générateurs de vapeur :

Les générateurs de vapeur sont soumis à des conditions sévères de haute Température, haute pression, environnement corrosif et un fonctionnement continu. Toutes ces conditions menacent l'intégrité du système et peuvent dans certains cas, Provoquées l'explosion du générateur de vapeur. Généralement, les explosions des Générateurs de vapeur sont de deux

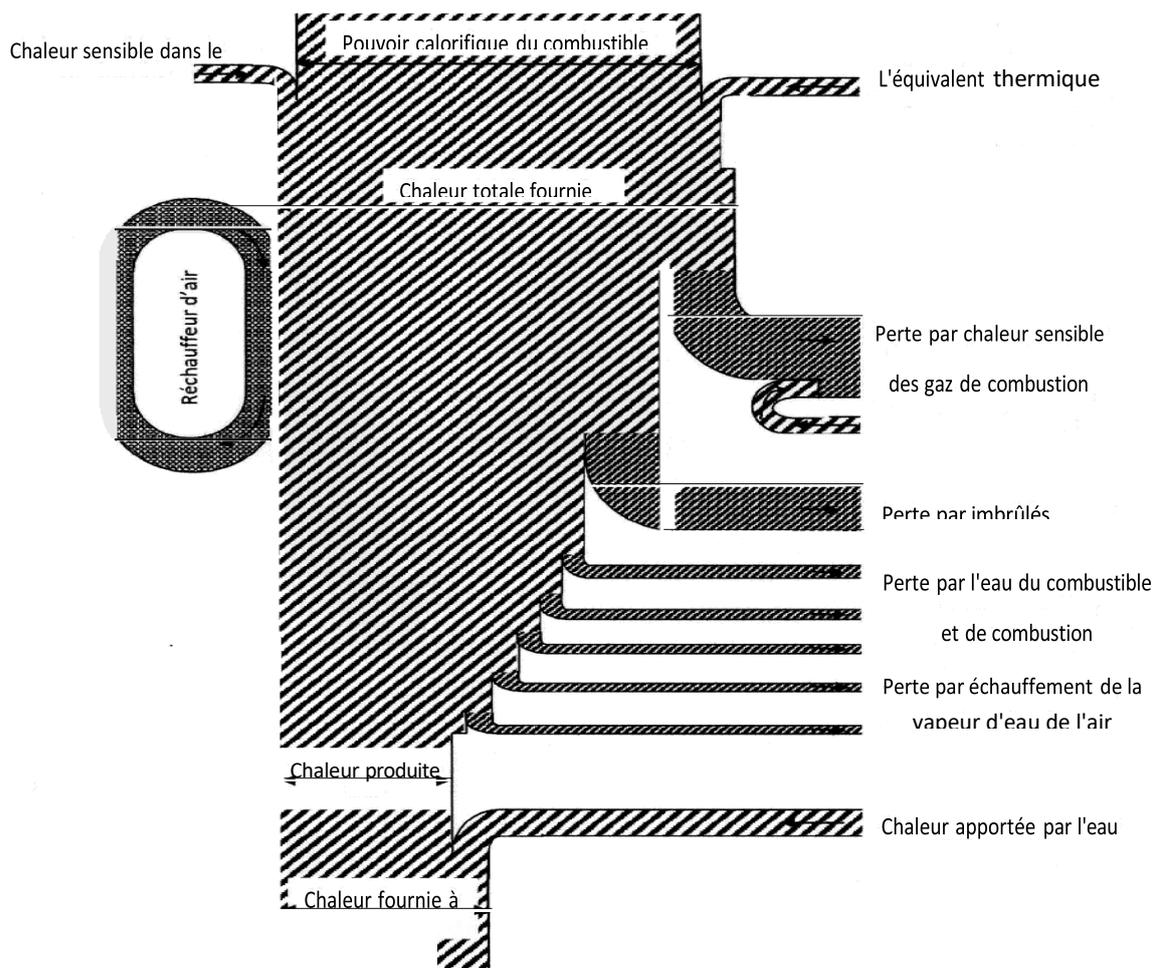
(02) sortes :

1. Explosion des parties sous pression (côté eau).
2. Explosion de la chambre de combustion (côté feu)

Les explosions de chaudière dues à la surpression interne sont généralement Désastreuses, souvent catastrophiques avec des dommages souvent étendus au Personnel. Voici quelques exemples sur les conséquences d'explosion des générateurs de vapeur à travers l'histoire.



Le principal avantage des générateurs sur les chaudières est de pouvoir répondre très rapidement à des variations brusques de la demande en vapeur.



**Figure 3.1** Représentation schématique du bilan thermique du générateur de vapeur

# **Chapitre 4**

## **Etude l'effet des paramètres physico- chimiques sur la vapeur produite**

### I.1. L'eau de mer :

Dans la mer ou l'océan, où la salinité est la plus élevée, l'eau de mer fait référence aux eaux marines côtières ou marines étendues. La salinité moyenne de l'eau de mer est d'environ 35 g/L, bien que cette valeur fluctue entre les régions et dans le temps.

Mer Baltique : 7 g/L, Méditerranée : 36-39 g/L, Golfe Persique : 40-70 g/L, Mer Morte : 270 g/L .

La pression osmotique de l'eau de mer est d'environ 26 bars et le pH est de 7,5 à 8,4 (l'eau de mer est un milieu légèrement basique) [1].

#### I.1.1. Composition de l'eau de mer :

Les sels se décomposent en cations et anions lorsqu'ils sont dissous dans l'eau. Considérez les deux exemples suivants :

\* Na Cl (Chlorure de sodium) se décompose en  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ .

\*  $\text{MgSO}_4$  (Sulfate de magnésium) se décompose en  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Les anions ont une charge électrique négative tandis que les cations ont une charge positive. Parce que la charge des cations et des anions est opposée et égale en valeur absolue, les sels sont électriquement neutres.

Plus de 99 % des sels dissous dans l'eau de mer sont constitués de six ions principaux. L'eau représente 96,5% (soit 965 g) dans 1 Kg (1000 mg) ou 1 L d'eau de mer. Le sel représente donc 3,5 % (soit 35 g) dont le Sodium ( $\text{Na}^+$ ) (30,6% du sel soit 10,7g), Chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) (55% du sel soit 19,25g), Sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) (7,7% du sel soit 2,7g), Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) (3,7% du sel soit 1,3g), Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) (1,2% du sel soit 0,42g), Potassium ( $\text{K}^+$ ) (1,1% du sel soit 0,39g) et autres constituants 0,7% (0,7% du sel soit 0,25g) dans les 35 g du sel qui reste autrement dit dans les 3,5% .

I.2. Les différentes techniques de dessalement des eaux de mer :

Il existe deux catégories de technologies actuelles :

- Procédés thermiques faisant intervenir un changement de phases : la distillation.
- Procédés utilisant des membranes : l'osmose inverse, l'électrodialyse.

La distillation et l'osmose inverse sont deux de ces technologies qui ont fait leurs preuves pour le dessalement et sur lesquelles nous allons nous concentrer. Les autres procédés pourraient être énumérées dans l'annexe et classées par ordre d'importance.

Quelle que soit la méthode proposée pour séparer le sel de l'eau, il y a quatre étapes de dessalement.

\* Une prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière

- \* Un prétraitement
- \* Le procédé de dessalement
- \* Le post-traitement

A l'issue de ces 4 étapes, l'eau de mer est rendue potable ou utilisable industriellement, elle doit alors contenir moins de 0,5g de sels par litre [4].

### **I-3- Matériels et méthodes :**

Nous avons effectué des prélèvements pendant 14 jours (du 09 mai 2021 au 23 mai 2021), pour but des analyses physico-chimique et organoleptiques un prélèvement par jour au niveau des trois points, , dans la station :

- A l'entrée d'eau de mer (tour de captage).
  - A la sortie d'eau produit.
- A la sortie de rejeté (saumure).

Cette étude est réalisée au niveau de laboratoire de contrôle de qualité de la station de dessalement d'eau de mer Cap-Djinet.

#### **I-3-1- Analyses physico-chimiques :**

##### **I-3-1-1 : Mesure de potentiel d'hydrogène(PH) :**

##### **Matériel utilisé :**

- \* Un pH-mètre (HACH, sens ion 3).
- \* Un bécher.
- \* Eau distillé.

##### **Mode opératoire :**

Mettre l'appareil en marche ; étalonner le avec de l'eau distillée.

- Plonger la sonde tout en agitant légèrement dans un bécher qui comporte environ 100 ml de notre échantillon.
- laisser stabiliser et lire en suite la valeur de PH.



Figure 1 : PH mètre

### I-3-1-2 : Mesure de la conductivité :

La mesure de la conductivité se fait avec un appareil multi- paramètres à sonde (HQ40d) (figure 2), ou bien (HACH, senson7) suivant le mode opératoire de la mesure de PH.



Figure 2 : Appareil multi- -paramètres de paillasse

### I-3-1-3 : Détermination de la dureté totale(TH) :

Le titre hydrotimétrique détermine la concentration en sel de calcium et de magnésium dissouts dans l'eau à analyser.

### Matériels utilisés:

- Fiole
- Burette
- Solution d'EDTA (0,02N).
- Solution tampon de Na OH (pH = 9.5 à 10 ).
- Noir d'uriochrome (NET) comme indicateur coloré.

### Mode opératoire :

Introduire 100 ml d'eau à analyser dans une fiole, ajouter 5 ml de la solution Tampon (Na OH) et trois gouttes d'indicateur coloré (NET) , la solution se colore en rouge foncé ou violet , commencer le titrage avec la solution d EDTA ( 0 ,02N) jusqu'a virage de couleur bleu .

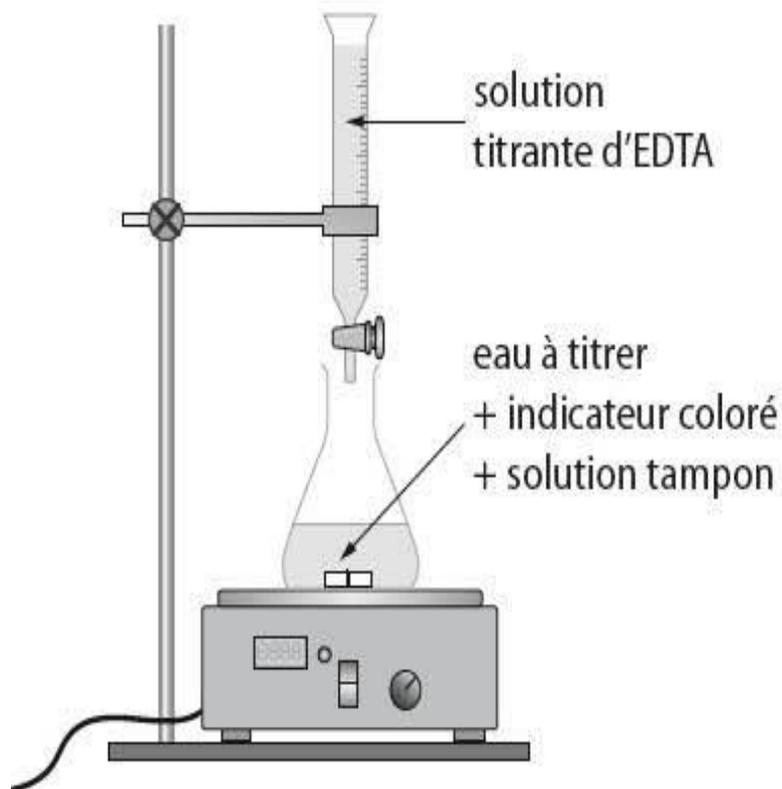


Figure 3 : détermination de titre hydrométrique (TH)

### Expression des résultats :

La concentration totale en calcium et magnésium, exprimée en milligramme par litre, est donnée par l'expression suivant :

$$\text{TH (mg/L)} = \frac{N_{\text{EDTA}} + V_{\text{EDTA}} * 1000}{V \text{ écha}}$$

## Chapitre 4 | Etude l'effet des paramètres physico-chimiques sur la vapeur produite

- NEDTA: Normalité d'EDTA.
- VEDTA: Volume d'EDTA.
- V écha: Volume d'échantillon.

### I-3-1-4 : Mesure de L'alcalinité :

#### a- Titre alcalimétrique simple (TA):

Correspond a les concentrations des ions carbonates (CO<sub>3</sub>) et les ions hydroxydes(OH<sup>-</sup>) dans l'eau à analyser .

#### Matériels utilisée :

- Erlenmeyer
- Burette
- Solution d'HCl (0.02N)
- Solution de phénolphtaléine (indicateur coloré).

#### Mode opératoire :

Verser 100 ml d'eau à analyse dans l'erlenmeyer, ajouter 2 à 3 gouttes de phénolphtaléine, une couleur rose apparaitre suite au changement de PH qui s'avère inferieur a 8.3. Titrer et agiter avec la solution d'HCl jusqu'à la décoloration complète de la solution .Dans le cas contraire ( la solution reste coloré ) la TA est nulle.

Expression des résultats :

$$TA \text{ (meq/l)} = \frac{(N \text{ HCl} \times V \text{ HCl}) * 1000}{V \text{ écha}} = 0,75$$

NHCL : Normalité HCl.

VHCL : Volume HCl.

V écha : Volume d'échantillon

#### b- Titre alcalimétrique complet (TAC) :

C'est la teneur en hydrogénocarbonate, hydroxyde libre et en carbonate contenus dans l'eau.

#### Matériels utilisés :

- Erlenmeyer.

## Chapitre 4 | Etude l'effet des paramètres physico-chimiques sur la vapeur produite

- Burette.
- solution d'HCl (0.02N).
- méthyle orange (indicateur coloré).

### Mode opératoire :

Verser 100 ml d'eau à analyse dans l'erenmeyer, ajouter 2 à 3 gouttes de solution méthyle orange une couleur jaune apparaitre suite au changement de PH qui s'avère inferieur a 8.3. Titrer et agiter avec la solution d'HCl jusqu'au virage de jaune au jaune orangé (PH=4.3).

Expression des résultats :

$$\text{TAC (meq/L)} = \frac{N \text{ HCl} * V \text{ HCl} * 1000}{V \text{ écha}} = 5,75$$

N HCL : Normalité HCl.

V HCL : Volume HCl.

V écha : Volume d'échantillon.

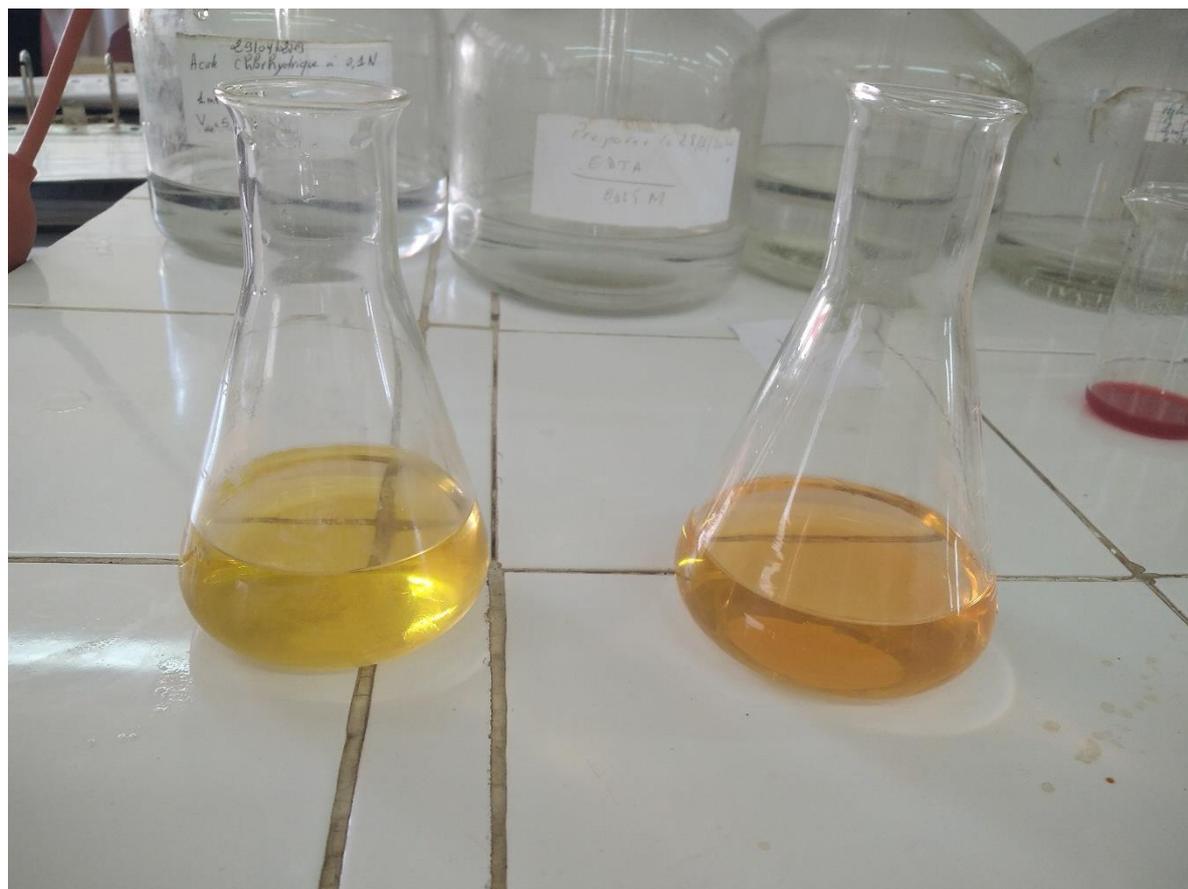


Figure 4 : détermination de TAC et TA

### I-3-2-Les résultats physico-chimiques :

Les résultats d'analyses des principaux paramètres physico-chimiques sont donnés dans le tableau I.1 .

**Tableau 1 : résultats journalier d'analyses physico-chimique**

Paramètre	PH	Cd brute $\mu\text{/cm}$	Cd corrigé $\mu\text{/cm}$	TH F°	Cl Mg/l	O2 y/l	N2H 3 y/l	NH3 Mg/l	Cu y/l	Fe y/l	SiO 2 y/l
Prise d'échantillon											
Ballon	9,2- 9,5 9,32	6,50	3 0,25	0	1					20	250 540 0 &/ 1
Vapeur surchauffée	9,5- 9,8 9,55	11,6 0	0,2 0,95 0,55							20	20
Vapeur resurchauffée	9,5- 9,8 9,55	11,5 0	0,2 0,95 0,50							20	20
Vapeur saturée	9,5- 9,8 9,60	10,1 6	0,2 0,90 0,70								
Eau d'extraction	9,5- 9,8 9,60	10,8 0	0,2 0,70								

## Chapitre 4 | Etude l'effet des paramètres physico-chimiques sur la vapeur produite

			0,55								
Eau alimentaire	9,5-9,8 9,65	10,1 6	0,2 0,90 0,70					2,5			
Eau d'appoint	9,5-9,8 9,62	11,0 0	1 0,82								
Eau de réfrigération	10-10,5 10	19	1	0	0						

Détermination des concentrations des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) et des carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) :

La détermination des concentrations des bicarbonates et les carbonates est fait selon le tableau suivant :

**Tableau 2 : Détermination de  $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$  à partir du TA et TAC.**

	TA=0	TA<TAC/2	TA=TAC/2	TA>TAC /2
OH-	0	0	0	$2\text{TA}-\text{TAC}=-$ 6,25
$\text{CO}_3^{2-}$	0	$2\text{TA}=1,5$	$\text{TAC}=5,75$	$2(\text{TA}-\text{TAC})=-$ 10
$\text{HCO}_3^-$	$\text{TAC}=5,75$	$\text{TAC}-$ $2\text{TA}=4,25$	0	0

- Le 2<sup>ème</sup> tableau présente les résultats physico-chimiques de l'eau de mer :

Echantillon	Mesure	Valeur déconseillé	Valeur mesure
Eau de mer	PH	7,5 – 7,8	7,6
	Conductivité	60ms/cm	39
Eau de chaudière	PH	9	8,88
	Conductivité	1000µ/km	680-700
Distillat	PH	5---8	6,58
	Conductivité	30µ/cm	28,5
	Cuivre	0,15ppm	
Saumure de Recirculation	PH	8	
	Conductivité	112ms/cm	35µs
	TA	V=0,5ml/TA= 2,5F°	2,5F°
	TAC	V=1,7ml/TAC=8,5F°	10,5F°
Rejet de saumure	PH	8	8,33
	Conductivité	120µ/cm	41,30µ/cm
	TA	V=0,4ml/TA=0,4*5=2F°	2F°
	TAC	V=2,3ml /TAC=11,5F°	11,5F°

**Tableau 3 : les analyses physico-chimique**

# **Chapitre 5**

## **Étude l'effet de la combustion sur la quantité et la qualité de vapeur produite**

## I. LA PRODUCTION DE VAPEUR :

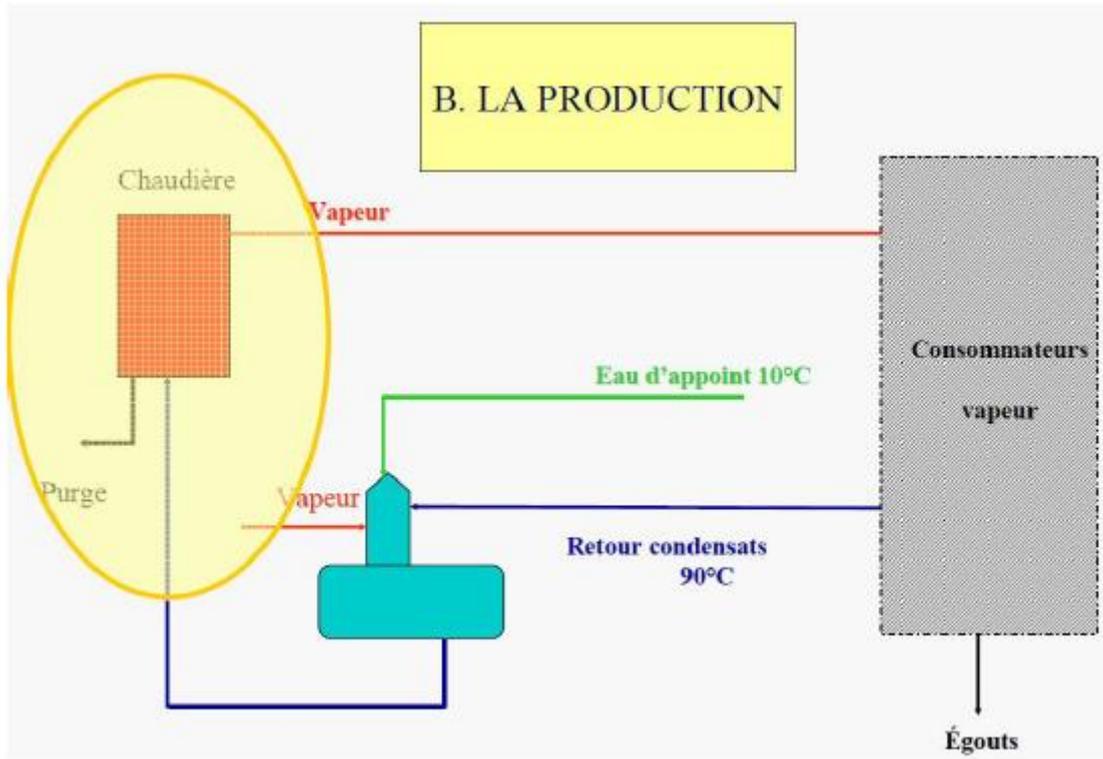
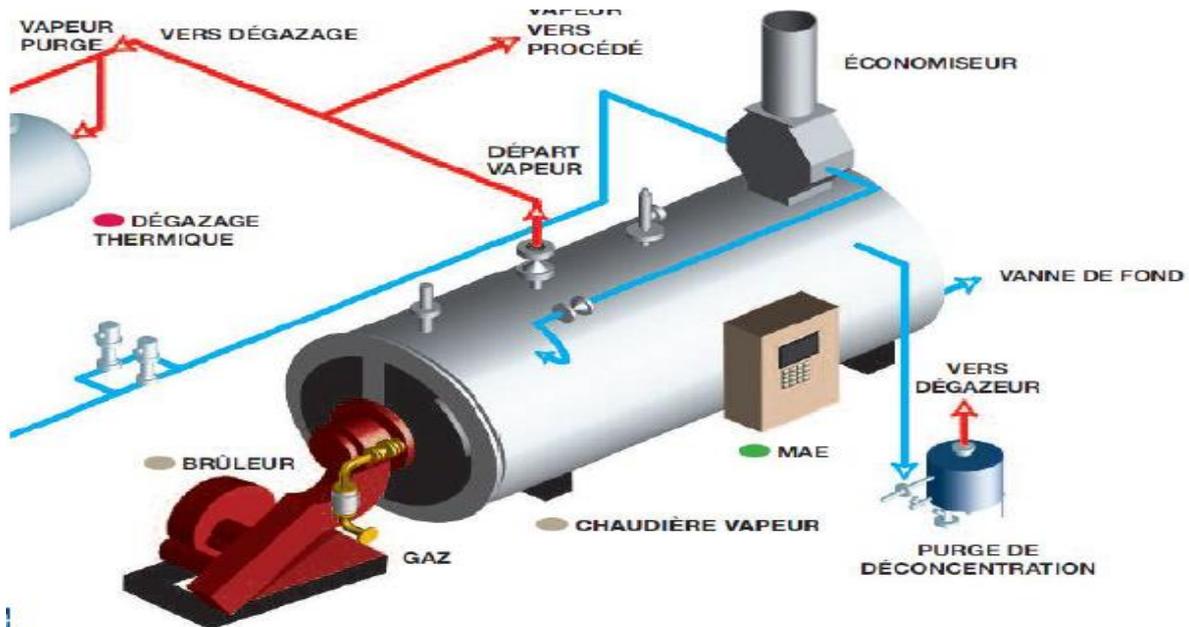


Figure 5.1 : schéma fonctionnement de la production de la vapeur

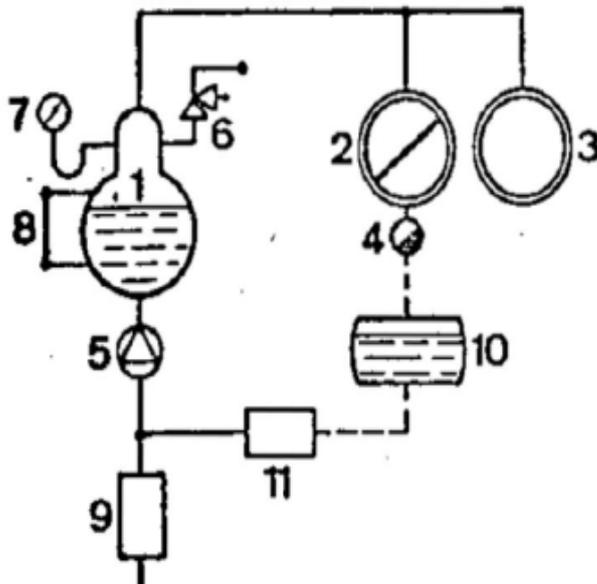
## II. Optimisation de la boucle vapeur



### III. La quantité de la vapeur

Installation d'un débitmètre vapeur pour : Valider l'énergie contenue dans la vapeur au moyen de 3 lectures de débit : vapeur, gaz et eau d'appoint

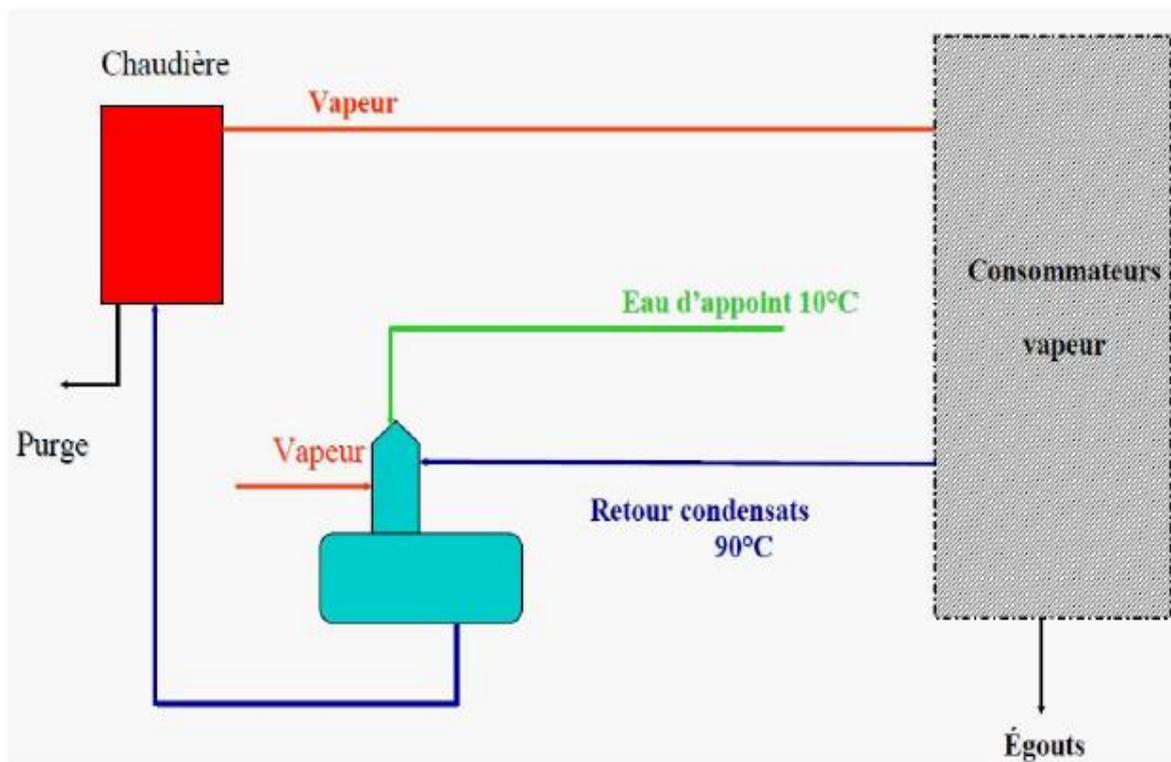
- Si les chaudières doivent produire de la vapeur à 9 bars saturés, cela signifie que la vapeur devrait avoir une chaleur totale de 2777,8 kJ/kg. Il est indispensable de le vérifier !
- Si la vapeur contient moins d'énergie qu'annoncé par la table vapeur, cela signifie qu'elle contient trop d'eau ; ce qui peut être source de coups de bélier dans les installations ! Et donc dangereux...



1. Chaudière (évent. échangeur de chaleur)
2. Consommateur de chaleur.
3. Consommateur de vapeur.
4. Purgeur d'eau condensée.
5. Pompe d'alimentation de la chaudière.
6. Soupape de sûreté
7. Manomètre
8. Indicateurs de niveau.
9. Traitement d'eau
10. Bâche d'alimentation.
11. Traitement de l'eau condensée.

#### IV. Validation de l'énergie contenue dans la vapeur sur base des données des compteurs et débitmètre :

- chaleur totale vapeur à 9 bar (table vapeur) : 2 777,8 kJ/kg
- débit vapeur à 9 bar (donnée débitmètre vapeur) : 10,0 t/h
- quantité d'eau d'appoint (donnée compteur eau) : 2,0 m<sup>3</sup>/h
- quantité de gaz consommée (donnée compteur gaz): 27 GJ/h
- rendement chaudière (donnée mesurée aux maintenances) : 90%
- énergie condensats 105°C; 0 bar (donnée table) : 438,9 kJ/kg
- énergie eau d'appoint 15°C (donnée table) : 62,7 kJ/kg



## V. La pression vapeur

### Réduire la pression vapeur en sortie chaudière :

Il est judicieux de vérifier que la vapeur produite à la chaudière n'a pas une pression trop élevée par rapport à la pression vapeur nécessaire auprès des consommateurs.

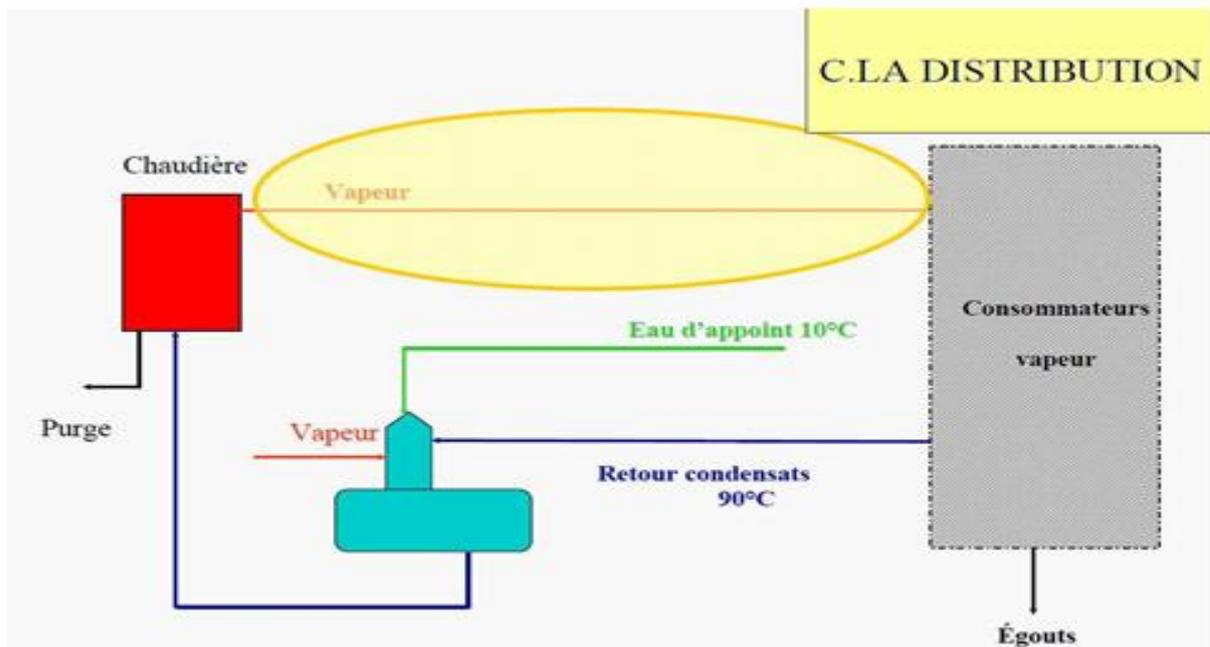
### Application pratique :

Economie engendrée par une réduction de la pression en sortie chaudière pour une chaudière au gaz naturel :		
chaleur totale vapeur 9 barg	2 778	kJ/kg
chaleur totale vapeur 8 barg	2 774	kJ/kg
différence énergie	4	kJ/kg
Production vapeur	20 000	t/an
→ Réductions de l'énergie dans la vapeur	$4 * 20\ 000 = 80\ 000$ MJ/an	soit 23 MWh PCI/an
→ Gain énergétique en gaz (rendement chaudière : 90% sur PCI)	$23/0,9 = 25$	MWh PCI/an

## VI. Exploitation optimale de la production de vapeur

- Vérifier régulièrement la température des gaz de fumée et les comparer chaque semaine à vos valeurs
- Vérifier à différentes heures d'une journée la pression de vapeur à la chaudière
- Contrôler périodiquement si le niveau d'eau dans la chaudière est stable
- Effectuer régulièrement les procédures relatives au traitement d'eau
- Contrôler la fréquence des purges d'ébouage de la chaudière
- Essayer de réduire les variations de charge et planifier s'il y a lieu la demande pour maximiser le rendement de la chaudière
- Fonctionner à la pression de vapeur la plus basse répondant aux exigences des utilisateurs (jour, nuit, week-end)
- S'assurer que la qualité de vapeur convient aux utilisateurs
- Arrêt des équipements non utilisés

VII. LA DISTRIBUTION DE LA VAPEUR :



# **Conclusion**

## **Générale**

## Conclusion Générale

Les analyses effectuées à la centrale thermique de Cap-Djinet nous permet d'évaluer l'efficacité des procédés de traitement qui sont à savoir : la filtration, la chloration, la distillation à détente successive et la déminéralisation à lit mélangé.

D'après les résultats que nous avons obtenus, l'eau finale est de bonne qualité pour son utilisation dans les chaudières haute pression. Cette eau est ensuite conditionnée dans le circuit eau-vapeur qui permet d'avoir une vapeur de très grande pureté.

On peut conclure à ce stade que les différents procédés de traitement de l'eau utilisés sont efficaces.

La quantité de chaleur réellement fournie dépend des pertes : de chaleur par les gaz de combustion sec, de chaleur due à l'humidité dans le combustible alimenté, de chaleur due à l'humidité dérivante de la combustion d'hydrogène ,due à l'humidité de l'air, de chaleur par rayonnement et convection et de chaleur due à la formation de dioxyde de carbone.

L'exploitation des résultats d'analyses des gaz brulés fournis par le service thermodynamique et économique de la centrale a permis la détermination du rendement de combustion qui est de l'ordre de 84%, ce résultat est jugé satisfaisant selon les valeurs exigées dans de telle installation (86%, 87%).

# Bibliographie

## Référence Bibliographique

- [1] Documentation interne de l'entreprise.
- [2] Notice technique sur les centrales thermique « chaleur, température, thermodynamique », fascicule N°2B, 2eme édition, Mars1968.
- [3] Notice technique sur les centrales thermiques ; fascicule N°7 A, 1972, générateur de vapeur.
- [4] KWU, Service de formation professionnelle, circuit eau-vapeur N°5B, de registration 5516.
- [5] Notice technique sur les centrales thermiques « Les traitements des eaux », fascicule N°10,2eme édition, Avril 1970.
- [6] A.Ghersallah, D.Saada « Exploitation d'une tranche de production », formation de travail, étape II, module VII.
- [7] Revue, l'eau et industriel (l'eau et des nuisances), 1979.
- [9] Lavoisier « traitement des eaux de refroidissement ».Londres New-York, 2006.
- [10] Simon Nisom « Dessalement de l'eau de mer par les réacteurs nucléaires », PDF 2007.
- [11] United Nations Environment-Méditerranéen action plan MED POL. « Se water désaliénation the mediterranean : Assesment and guideline ».MAP technique report servies N° 139, VNEP/MAP Athens, 2003.
- [12] S.Fekir, S.Toukalis, 2005, essai de résolution de problème de l'entartage des circuits de refroidissement au sein du l'unité (gaz industriel REGHAIA) ».
- [13] KWU. Service de formation professionnelle (Déminéralisation des eaux), registration N° 5504.
- [14] <http://www.futura-sciences.com>
- [15] le rendement de la chaudière AI-S/3.2 Centrale thermique de Cap-Djinet.