



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar - El OUED

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

**Etude et conception d'une installation
d'une centrale thermique à cycle combiné
(Dans la station SP1 BIS de DJAMAA)**

Devant le jury composé de :

Mr. MANSOURI Khaled : Président
Dr. NECIB Djilani : Examineur
Dr. BOULIFA M. Iliasse : Encadreur

Réalisé par :

- MEHDA Amara
- ZITOUNA HAMED Massoud
- GUEMARI Haythem

Année universitaire : 2020/2021

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- **La mémoire de mon père,**
- **A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, ma mère.**
- **Mes chers frères et mes chères sœurs**
- **Tous mes amis.**

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu le Tout-Puissant pour l'achèvement de ce travail.

Je tiens à remercier mon promoteur Dr: BOULIFA Mohammed Iliasse d'avoir accepté de m'encadrer et de me suivre durant toute cette période de travail.

Mes remerciements vont aussi au président du jury et aux membres du jury examinateurs qui m'ont fait l'honneur de participer au jury de ce travail.

Je remercie également tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Surtout Mr. Mohamed BOULIFA, ingénieur au SP1 BIS Djamaa, Mr. DEGHOUM Khalil et Mr. MOKADDEM Mohammed Bachir.

Nous remercions également le professeur BEN AMOR Siham et l'étudiant BOUTAYEB Al-Afra.

Enfin notre remerciement est adressé à tous les enseignants qui ont participé à notre formation.

Liste des figures

Chapitre I : Turbines à gaz		page
Figure I.1	Turbine à gaz.	03
Figure I.2	Différents composants d'une turbine à gaz	04
Figure 1.3	Définitions des températures de flamme	06
Figure I.4	Bilan énergétique dans le brûleur	07
Figure I.5	Organigramme de la classification des turbines à gaz	09
Figure I.6	Schéma d'une turbine à gaz mono-arbre	10
Figure I.7	Schéma d'une turbine à gaz bi-arbre.	11
Figure I.8	Schéma d'une turbine à gaz avec régénération	12
Figure I.9	Schéma d'une turbine à action et à réaction	13
Figure I.10	La variation de la pression et de température dans les différentes sections de la TAG aux phases de fonctionnement	14
Chapitre II : Turbine à vapeur		
Figure II.1	Schéma d'une turbine à action et turbine à réaction Tirée de Emoscopes (2006)	20
Figure II.2	Schéma de la turbine à vapeur	22
Figure II.3	principe de fonctionnement d'un turbine a vapeur	23
Figure II.4	Turbine non composée sans réchauffeur Adaptée de Byerly (1973)	26
Figure II.5	Turbine composée avec un seul arbre et un réchauffeur Adaptée de Byerly (1973)ost	26
Figure II.6	Turbine composée avec un seul arbre et deux réchauffeurs Adaptée de Byerly (1973)	26
Figure II.7	Turbine composée avec deux arbres et un réchauffeur Adaptée de Byerly (1973)	27
Figure II.8	Turbine composée avec deux arbres et un réchauffeur Adaptée de Byerly (1973)	27
Figure II.9	Turbine composée avec deux arbres et deux réchauffeurs Adaptée de Byerly (1973)	28
Figure II.10	Configuration modélisée, Turbine composée avec un seul arbre et un	28

	réchauffeur Adaptée de Byerly (1973)	
Chapitre III : Centrale thermique à cycle combiné		
Figure III.1	Centrale à cycle combiné	31
Figure III.2	Principe d'une centrale à gaz à cycle combiné	32
Figure III.3	Schéma général d'un cycle combiné	33
Figure III.4	Diagramme T-S de la TG cycle combiné	34
Figure III.5	Diagramme (T-S) d'un cycle combiné	34
Figure III.6	Schéma représentant la cogénération, cas d'un cycle combiné	35
Figure III.7	Schéma d'une installation à cycles combinés gaz-vapeur	36
Figure III.8	Installation à cycles combinés avec récupérateur de chaleur et postcombustion	37
Figure III.9	paramètres du rendement à cycle combiné	37
Figure III.10	Schéma d'un cycle combinés gaz-vapeur	40
Chapitre IV: Travail expérimental		
Figure IV.1	Plan de situation SP1 bis Djamâa	43
Figure IV.2	L'écran principal du logiciel « Cycle-tempo ».	45
Figure IV.3	Zone de travail du logiciel « Cycle-tempo ».	46
Figure IV.4	Fenêtre de dessin du logiciel « Cycle-tempo ».	46
Figure IV.5	Conception de la turbine à gaz	52
Figure IV.6	Description des appareils utilisés la turbine à gaz	52
Figure IV.7	Paramètres de la turbine à gaz	53
Figure IV.8	Paramètres de compresseur	53
Figure IV.9	Paramètres de la chambre combustion	54
Figure IV.10	Paramètres de la source 4	54
Figure IV.11	Paramètres de la source 5	55

Figure IV.12	Paramètres d'échappement	55
Figure IV.13	Paramètres de générateur	56
Figure IV.14	Conception de la turbine à vapeur	56
Figure IV.15	Description des appareils utilisés la turbine à vapeur	57
Figure IV.16	paramètres de la turbine	57
Figure IV.17	Paramètres du condenseur	58
Figure IV.18	Paramètres de la pompe	58
Figure IV.19	Paramètres de la chaudière	59
Figure IV.20	Paramètres d'échappement	59
Figure IV.21	Paramètres de la source 6	60
Figure IV.22	Paramètres de la source 7	60
Figure IV.23	Paramètres de générateur	61
Figure IV.24	Conception d'une centrale thermique à cycle combiné	61
Figure IV.25	Description des appareils utilisés dans centrale thermique à cycle combiné	62
Figure IV.26	Interface du programme présentant les icones d'entrée et des résultats	63
Figure IV.27	Interface du programme présentant les formules utilisées dans le calcul.	63

Liste des tableaux

Chapitre IV: Travail expérimental		
Tableau IV-1	les données thermodynamiques de cycle tempo	47
Tableau IV-2	Résumé des types des appareils disponibles	48

Liste des abréviations

GE: General Electric.

NP: Nuovo Pignone.

TG: Turbine à gaz.

GPL: Gaz de pétrole liquéfié.

H: Enthalpie

SFC : Specific fuel consumption.

HP: Haute pression .

BP : Basse pression.

Nnom : Représente la puissance nominale donnée par le constructeur.

Kn : Coefficient caractérisant l'état technique de la turbine .

Kt : Coefficient tenant compte de la température de l'air .

Tad : Température d'admission de l'air dans le compresseur axial .

Tst : Température aux conditions standards .

Pad: Pression d'admission de l'air dans le compresseur axial qui dépend de l'altitude ou se trouve la turbine.

q_{gc}^{nom} : Consommation nominale en gaz combustible par la turbine.

K_g : Coefficient tenant compte de la variation de l'unitaire en fonction de l'état technique de la turbine. pour une turbine neuve.

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur du Gaz .

TP : Transformateur principal .

TS : Transformateur de soutirage.

TD : Transformateur De Démarrage.

IP : pression intermédiaire.

LP : Faible Pression.

η_v : Rendement de la turbine à vapeur.

W_{uf} : Travail utile fourni .

Q_v : Quantité de chaleur absorbée .

CO₂ : Carbon dioxide.

SO₂ : Sulfur dioxide .

CO : Monoxide de Carbone.

ABB : Alstom power.

TGV: La turbine à gaz et vapeur.

Qg : la chaleur chaude
Wg : Le travail utile
Qc : La chaleur rejetée au condenseur
Qg : les pertes .
Qv : La chaleur fournie au cycle à vapeur.
MTBF : Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement.
SP1 Bis : Station de Pompage N°1 Bis.
TP : Turbo Pompes .
PIN : Pression d'entrée
POUT : Pression de sortie
DELP : Différence de pression .
TIN : Température d'entrée
TOUT : Température de sortie
DELT : Différence de Température
OB1 : Oléoduc Béjaia .
J : Joule
K : Kelvin
mol : Mole
kg : Kilogramme
h : Heure
bar : Bar
m : Mètre
kcal : kilocalorie
KV : kilo volt
KW : Kilo watt
°C : degré Celsius

Sommaire

Remerciements	
Dédicace	
Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	iv
Liste des abréviations	v
Introduction générale.....	01
Chapitre I : Turbines à gaz	
I.1. Introduction.....	02
I.2. Historique de la turbine à gaz.....	02
I.3. Définition.....	02
I.4. Présentation.....	03
I.5. Composants d'une turbine à gaz.....	04
I.5.1. Entrée d'air.....	04
I.5.2. Compresseur.....	05
I.5.3. Chambre de combustion.....	05
I.5.4. Turbine de détente.....	08
I.5. 5. Echappement de la turbine à gaz.....	08
I.6. Classification des turbines à gaz.....	09
I.6.1.Selon le mode de construction.....	09
I.6.2.Selon le mode de fonctionnement thermodynamique.....	11
I.6.3.Selon le mode de travail.....	12
I-7- Principe de fonctionnement de la turbine à gaz.....	13
I.8.Applications des turbines à gaz.....	14
I.9.Avantages et inconvénients des turbines à gaz.....	16
I.9.1.Avantages.....	16
I.9.2.Inconvénients.....	16

I.10. Conclusion	16
Chapitre II : Turbine à vapeur	
II.1. Introduction	17
II.2. Turbine à vapeur.....	17
II.2.1. Définition.....	17
II.2.2. Principes généraux de fonctionnement de la turbine à vapeur.....	17
II.2.3. Types des turbines à vapeur.....	20
II.3. Les principaux composants des turbines à vapeur.....	21
II.4. Fonctionnement.....	22
II.5. Classification des turbines à vapeur.....	23
II.6. Avantages et inconvénients des turbines à vapeur.....	28
a. Avantages.....	28
b. Inconvénients.....	29
II.7. Le rendement de la turbine à vapeur.....	29
II.8. Conclusion.....	29
Chapitre III: Centrale thermique à cycle combiné	
III.1. Introduction	30
III.2. Définition.....	30
III.3. Centrale à cycle combiné.....	31
III.4. Principe de fonctionnement.....	32
III.5. Diagramme entropique d'un cycle combiné.....	34
III.6. Cycle Combiné / La Cogénération.....	35
III.6.1.Principe d'une installation à cycle combiné.....	36
III.6.2.Rendement du cycle combiné.....	37
III.6.3.Les avantages du cycle combiné.....	38
III.7. Conclusion	41
Chapitre IV :Travail expérimentale	
IV.1 Introduction	42

IV.2. Description du lieu de stage pratique.....	42
IV.2.1. Présentation de la station de pompage SP1 BIS de Djemaa.....	42
IV.2.2. Descriptif de l'environnement immédiat.....	43
IV.2.3. Description de l'activité du site.....	43
IV.2.4. Composantes de l'installation.....	43
IV.2.5. Caractéristiques techniques des installations.....	44
IV.3. Méthodes expérimentales.....	44
IV.4. Simulation.....	51
IV.4.1. Conception d'une installation d'une turbine à gaz.....	52
IV.4.2. Conception d'une installation d'une turbine à vapeur.....	56
IV.4.3. Conception d'une installation d'une centrale cycle combiné.....	61
IV.5. Programmation.....	62
IV.6. Conclusion	64
Conclusion générale.....	65
bibliographie	
Résumé	

Introduction générale

Introduction générale

L'économie algérienne repose essentiellement sur l'énergie (gaz et pétrole) et pour produire de l'électricité, injecter les matières dans les zones de raffinage, de liquéfaction et de transport on utilise des machines appelées turbines. Les plus importantes sont les turbines à gaz où son utilisation conduit à des émissions des gaz brûlés à des très hautes températures près de 500°C. Afin de réduire la pollution de ces gaz et de préserver l'environnement, plusieurs recherches scientifiques ont été conduites sur la façon d'exploiter les gaz d'échappement, elles ont atteint à établir un cycle combiné, qui nécessite essentiellement une haute température pour produire la vapeur nécessaire pour alimenter la turbine à vapeur.

Les niveaux de température des gaz d'échappement des turbines à gaz sont de l'ordre de grandeur maximale des températures des installations motrices à vapeur. Le principe de cycle combiné est de récupérer l'enthalpie des gaz d'échappements de la turbine par le biais d'une chaudière de récupération alimentant un cycle de vapeur. Cette constatation est à l'origine du couplage entre les turbines à gaz et de turbine à vapeur qui donne lieu à ce qu'il est convenu d'appeler des cycles combinés.

L'objectif de notre travail est d'étudier le fonctionnement d'une centrale thermique à cycle combiné par la conception d'une installation de ce cycle par la combinaison de deux cycles de la turbine à gaz et celui de la turbine à vapeur et la comparaison entre eux.. .

Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en quatre chapitres :

- ❖ Dans le premier chapitre, on fait une nous avons présenté des généralités concernant les turbines à gaz.
- ❖ Dans le deuxième chapitre, couvre les turbines à vapeur générales et vise à présenter le principe de fonctionnement, les types et les différentes configurations.
- ❖ Dans le troisième chapitre, comporte des généralités et des rappels sur que les cycles combinés
- ❖ Dans le quatrième chapitre est consacré à la présentation de centrales SP1 BIS DJAMAA.
- ❖ A la fin, on termine ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I :

Turbine à gaz

I.1. Introduction

Les turbines à gaz ont connus au cours dernières années un développement considérable dans des nombreuses applications industrielles. En particulier dans le domaine du transport et de réinjection du gaz. [1]

I.2. Historique de la turbine à gaz

En 1961 la firme - NUOVO PIGNONE - a commencé la production des turbines à gaz pour application fixe (destinées en premier lieu à l'industrie pétrochimique). Ces turbines sont fabriquées sur la base d'un accord stipulé avec GENERAL ELECTRIC. Les modèles MS 3000-5000-7000 et 9000 sont entièrement projetés par GE qui fournit à NP les parties tournantes et les aubages. [2]

I.3. Définition

La turbine à gaz est un moteur à combustion interne de tous les points de vue. Elle peut être considérée comme un système autosuffisant. En effet, elle prend et comprime l'air atmosphérique dans son propre compresseur, augmente la puissance énergétique de l'air dans sa chambre de combustion et convertie cette puissance en énergie mécanique utile pendant les processus de détente qui a lieu dans la section turbine. L'énergie mécanique qui en résulte est transmise par l'intermédiaire d'un accouplement à une machine réceptrice, qui produit la puissance utile pour le processus industriel.

Sous sa forme la plus simple, une turbine à gaz comprend un compresseur axial qui aspire l'air à la pression atmosphérique; une chambre de combustion, où l'air comprimé est réchauffé à pression constante par la combustion d'une certaine quantité de combustible (gaz naturel, gasoil ou kérosène) et enfin une turbine de détente des gaz jusqu' à la pression atmosphérique Figure(I-1)[3].



Figure(I-1): Turbine à gaz. [04].

I.4. Présentation

Les turbines à gaz sont construites dans une gamme très large de puissance de 25 kW à 250 MW. A poste fixe, les combustibles utilisés sont, pour les turbines courantes, du gaz (naturel, GPL ou biologique) ou du fuel domestique. Les TG peuvent aussi brûler du fuel lourd ; mais celui-ci doit subir des traitements très complexes (enlèvement du sodium et des particules solides, inhibition du vanadium, etc.). De plus, les gaz d'échappement doivent aussi être traités pour répondre aux normes environnementales. L'exploitation et la maintenance sont donc beaucoup plus coûteuses et la durée de vie réduite.

Le combustible doit être injecté dans les chambres de combustion à des pressions élevées (13 à 45 bar). Cela est aisé pour les fiouls. Par contre, le gaz naturel est délivré par des réseaux, soit de transport entre 40 et 75 bars, la combustion dans une TG s'effectue avec des excès d'air très importants (350 à 500%). La puissance fournie par une TG dépend des caractéristiques de l'air aspiré .

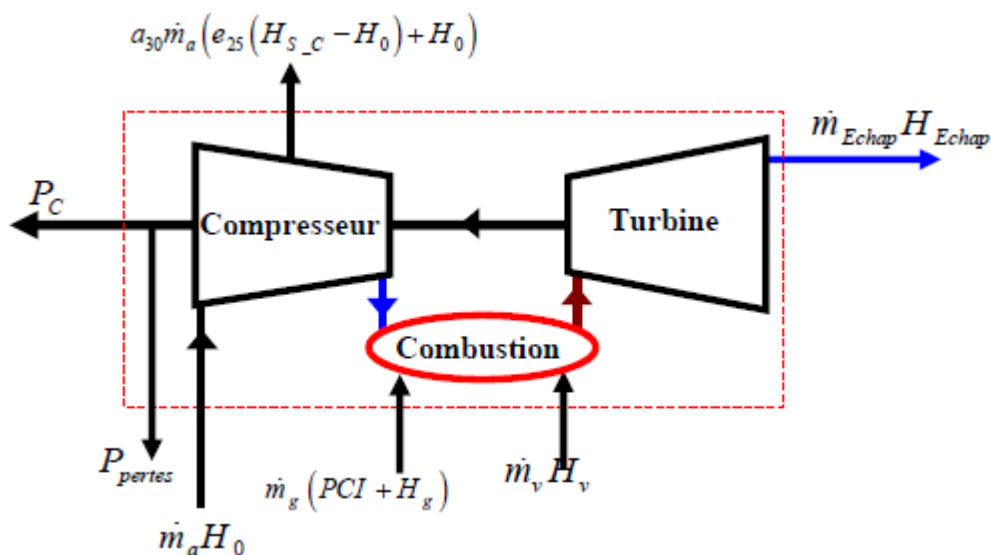
Température, humidité et pression. Elle va donc varier suivant la saison et l'altitude du lieu d'implantation. De même, la puissance est fonction des pertes de charge amont sur l'air aspiré quasiment, toute l'énergie thermique du combustible non transformée en

énergie mécanique se retrouve sous forme de chaleur dans les gaz d'échappement. Ceux-ci sont donc très Chauds (entre 450 et 550°C) et servent, à réchauffer des fluides caloporteurs ou utilisés pour la production de la vapeur.

Les gaz d'échappement des TG sont peu chargés en poussières et comportent 15% à 17% d'oxygène. Ils peuvent être utilisés dans l'industrie pour le chauffage direct de séchoirs et, surtout, comme air comburant dans des brûleurs spéciaux dits de postcombustion qui s'adaptent à des chaudières ou à des générateurs. On obtient ainsi d'excellentes performances globales. [04].

I.5. Composants d'une turbine à gaz

Une turbine à gaz (figure(I-1)) est constituée par : une entrée conditionnant l'air (filtration et éventuellement refroidissement), un compresseur, une chambre de combustion, une turbine de détente, l'échappement vers une cheminée. Pour la production d'électricité, une majorité de turbines à gaz sont construites autour d'un seul arbre sur lequel sont disposés le compresseur, la turbine de détente, l'alternateur et éventuellement certaines pompes ou un réducteur pour les machines de puissance inférieure à 100 MW [15-18, 65-68] Figure(I-2). [5].



Figure(I-2) : Différents composants d'une turbine à gaz [5]

I.5.1. Entrée d'air

Elle comporte un système de filtration générant une perte de charge qui varie de 0,3 % à 1,3 % (usuellement exprimée en mm de colonne d'eau : de 30 à 130 mm CE) en fonction de

son encrassement ; il est modélisé par un coefficient de perte de charge, qui peut être calé sur une perte de charge de 0,6 % à pleine puissance. L'éventuel refroidissement de l'air à l'entrée sans descendre au-dessous d'une température de 5 à 7 °C pour éviter les problèmes de givrage, s'effectue par des systèmes réfrigérants à évaporation, à brumisation d'eau ou à fluide caloporteur froid. Le premier et le dernier de ces systèmes induisent une perte de charge supplémentaire de l'ordre de 0,25 %. Les deux premiers sont efficaces en cas d'air chaud et sec et utilisent l'enthalpie de vaporisation de l'eau pour refroidir l'air en accroissant son humidité à respectivement 90 % et 95 %. La mesure de la perte de charge dans l'entrée d'air est importante pour estimer l'encrassement des filtres en la corrigeant des influences du débit d'air aspiré et des conditions atmosphérique [5].

I.5.2. Compresseur

Celui-ci utilise plus de la moitié de la puissance produite par la turbine de détente, puissance qui s'exprime suivant l'équation(I-1) en tenant compte des prélèvements d'air aux étages intermédiaires pour refroidir les parties chaudes .

$$P_c = (m_a - \sum m_{Ref})H_{S-C} + \sum m_{Ref}H_{Ref} - m_a H_{E-C} \quad (1)$$

L'enthalpie H peut être estimée en gaz parfait à partir de la température, donc l'estimation de la puissance du compresseur nécessite la mesure des températures de l'air à son entrée et à sa sortie. Les débits d'air sont mesurés à l'aide de diaphragme ou de venturi-tuyère équipés de prises de pressions statiques et totales. [5]

I.5.3. Chambre de combustion

Elle se traduit par une perte de charge de l'ordre de 6 % et par un échauffement de l'air lié à la combustion du gaz avec un rendement proche de 100 %. C'est dans la chambre de combustion que peut être injectée de l'eau ou de la vapeur pour soit réduire les émissions d'oxydes d'azote, soit augmenter la puissance produite ; cette possibilité est introduite sous la forme d'un débit d'eau m_{eau} à une enthalpie H_{eau} . Le bilan énergétique dans la chambre de combustion s'exprime par :

$$\begin{aligned} & \left((1 - a_{30})m_a - \sum m_{Ref} + m_e + m_g \right) H_{fl} \\ & = m_g PCI + \left((1 - a_{30})m_a - \sum m_{Ref} \right) H_{S-C} + m_g H_g + m_e H_e \end{aligned} \quad (2)$$

La température des gaz à la sortie de la chambre de combustion n'est pas mesurable car

trop hétérogène et élevée et n'est accessible par cette formule que si le PCI du combustible est connu. Sa connaissance conditionne la durée de vie des parties chaudes en effet :

- la température entrée turbine ISO (telle que définie par la norme ISO 2314) qui suppose que tout le débit d'air entrée turbine à gaz passe dans la chambre de combustion, qu'il n'y a pas de prélèvement d'air sur le compresseur et que l'entrée d'air et son échappement s'effectuent sans perte de charge. C'est la valeur la plus basse ;
- la température entrée roue de turbine qui est calculée en considérant que l'air sortie chambre de combustion est parfaitement mélangé avec l'air de refroidissement de la directrice d'entrée. C'est une valeur intermédiaire d'environ 80 °C plus élevée que la précédente, ce qui signifie que le débit d'air de refroidissement des aubes et cavités en aval est de l'ordre de 8 % du débit total ;

la température sortie de chambre combustion qui est calculée avec le débit d'air qui traverse les tubes à flamme, soit environ 80 % du débit d'air entrée compresseur. C'est la plus élevée environ 80 à 100 °C d'écart avec la précédente, figure(I-3). Le débit d'air qui traverse les tubes à flamme est accessible par la

mesure de la courbe débit-réduit/perte de charge d'un tube à flamme au banc d'essai. [5]

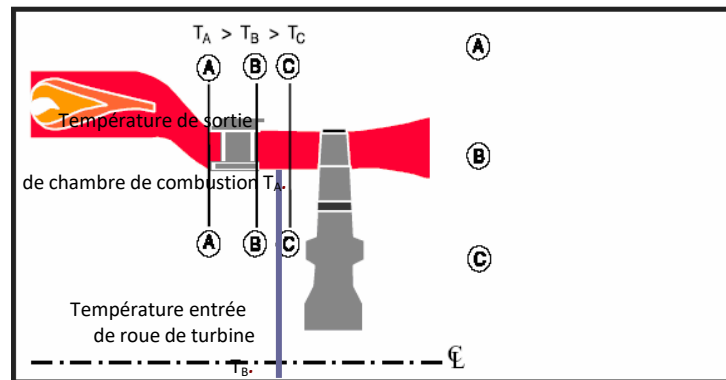


Figure (I-3) : Définitions des températures de flamme [5] .

Dans le brûleur, la température des gaz est élevée de T2 à T3 afin d'optimiser la combustion, on doit doser correctement le rapport carburant/air défini par :

$$f = \frac{m_f}{m_a} \quad (3)$$

Le problème consiste à déterminer le rapport f requis pour transformer une unité de

masse d'air à T_2 et f unité de masse de carburant à T_f en $(1+f)$ unité de produits de combustion à T_3 , figure(I-4).

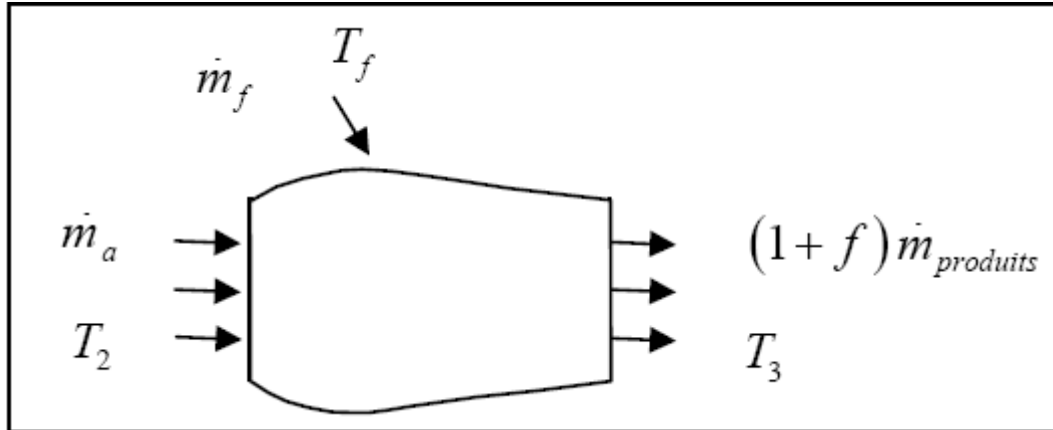


Figure (I-4) : Bilan énergétique dans le brûleur [5].

- **Efficacité de la combustion**

Le rapport ainsi déterminé a été calculé pour des conditions idéales d'une combustion complète. Pour comptabiliser les différentes pertes, on introduit :

$$n_{com} = \frac{f_{id}}{f_{rel}} \quad (4)$$

Avec : f_{id} est le rapport idéal du carburant-air pour un ΔT donnée.

f_{rel} est le rapport réel du carburant-air pour un ΔT donnée. [5]

En général $n_{cmb} = 98\%$

- **Vitesse de propagation d'une flamme dans un mélange laminaire**

Plusieurs approches ont été faites pour essayer de prédire cette vitesse de propagation, les théories thermiques montraient que la vitesse de flamme était proportionnelle à la racine de la diffusivité thermique et à la racine du temps de réaction moyen [6].

$$s_l \simeq \sqrt{\frac{\lambda}{\rho_i C_p' \tau_c}} \quad (5)$$

Avec λ la conductivité thermique et τ_c le temps chimique nécessaire à la réaction, inversement proportionnel au taux de réaction moyen ($\bar{\omega}'$) :

$$\tau_c = \frac{1}{\omega} \quad (6)$$

L'expression déduite de ceci pour l'épaisseur de flamme est donnée par :

$$\delta \sim = \frac{a_i}{s_i} \sim \sqrt{\frac{1}{2} a \cdot \tau_c} \quad (7)$$

Où a est la diffusivité thermique des gaz chauds.

- **Consommation spécifique**

Bien que le concept de rendement thermique soit utile pour la comparaison de cycles thermodynamiques, il est plus pratique d'utiliser une mesure de la performance qui inclut le débit du carburant. Ainsi, la performance des turbines à gaz est très souvent exprimée par la consommation spécifique, appelée *SFC* (Specific fuel consumption) [5].

$$S.F.C = \frac{m_f}{p_{net}} \quad (8)$$

I.5.4. Turbine de détente

Elle produit l'énergie pour entraîner le compresseur et l'alternateur. Elle est modélisée

$$P_t = \left((1 - a_{30})m_a - \sum m_{Ref} + m_g + m_e \right) H_{fl} = m_g PCI + \left((1 - a_{30})m_a - \sum m_{Ref} \right) H_{S-C} + m_g H_g m_e H_e \quad (9)$$

L'hypothèse que l'air à travers la directrice d'entrée travaille dans la turbine est généralement employée par les constructeurs et les conditions chaudes amont sont prises à l'entrée de la roue de turbine. Cependant, le plus simple est de calculer aux conditions ISO puisque les débits d'air de refroidissement sont considérés négligeables. Certaines turbines à gaz ont leur air de refroidissement qui se refroidit à travers un échangeur qui prélève HR éfr en chauffant de la vapeur ou le combustible.

La mesure la plus délicate est celle de la température moyenne des fumées à l'échappement : en effet la répartition des températures est hétérogène et pour avoir une mesure représentative, un nombre important de thermocouples est nécessaire, localisés au minimum sur deux diamètres. C'est une donnée essentielle, et sur certaines turbines à gaz, un coefficient de correction est appliqué à la mesure pour la «caler» sur la valeur réelle. [5]

I.5.5. Echappement de la turbine à gaz

Il influe par la perte de charge qui est créée par tous les éléments en aval : diffuseur d'échappement (de 0,5 à 1 %), grille de tranquillisation (0,5 %), système de réchauffe des gaz (0,3 %), chaudière, vannes et coudes, cheminée.

I.6. Classification des turbines à gaz

Le monde connaît un grand développement industriel, et une diversité à la construction des turbomachines dans les dernières années. Cette diversité est variée selon les domaines d'application ou bien les objectifs d'utilisation de ces machines ; dans ce terme on peut classer les turbines à gaz en trois grandes familles comme démontré dans la figure ci-dessous (Figure. I.5) : [15].

- ❖ Selon le mode de construction.
- ❖ Selon le mode de fonctionnement thermodynamique.
- ❖ Selon le mode de travail.

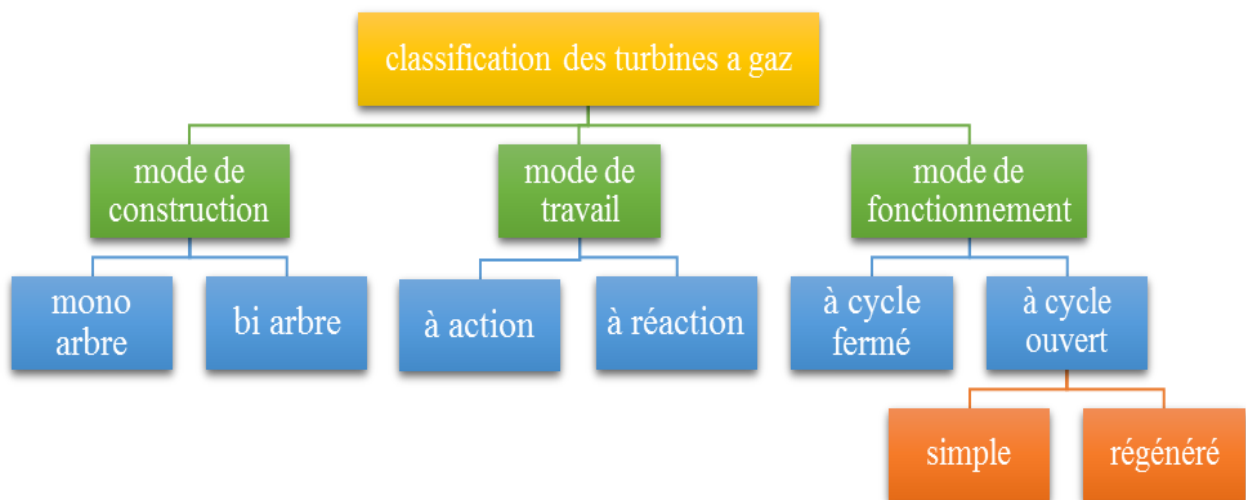


Figure (I-5) : Organigramme de la classification des turbines à gaz[15].

I.6.1. Selon le mode de construction

On peut classer les turbines à gaz selon le mode de construction, à cet égard, on distingue deux types principaux ; turbines à gaz mono-arbre, et turbines à gaz bi-arbres[7].

✓ **Turbine mono-arbre :**

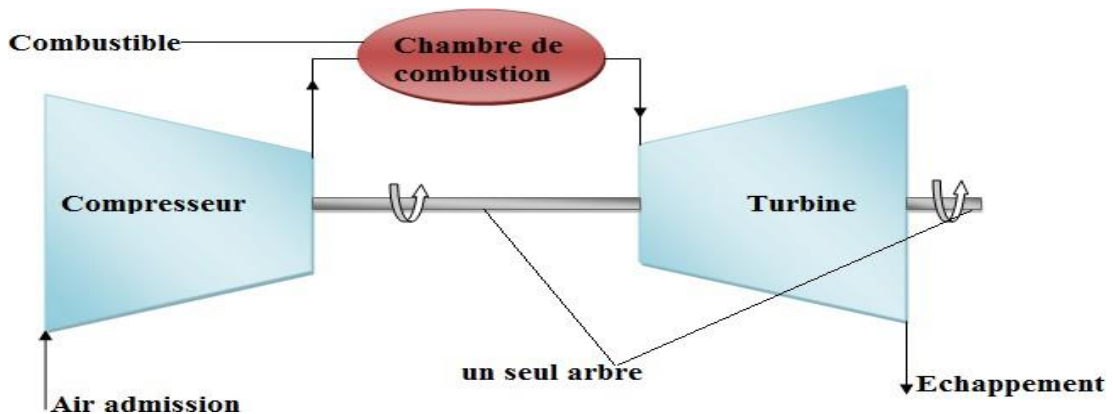


Figure (I-6) : Schéma d'une turbine à gaz mono-arbre [7].

Dans ce type de turbine à gaz ; le compresseur d'air, la turbine de détente et la machine entraînée sont sur le même arbre (Figure. I.6). Cette solution a l'avantage d'une grande simplicité mais conduit à une plage d'utilisation de vitesse limitée, à un moins bon rendement à charge partielle qu'une turbine à deux arbres. De plus, le moteur de lancement doit entraîner l'ensemble de la ligne d'arbre.

La turbine à un seul arbre est le plus souvent utilisée pour l'entraînement d'alternateur dont la vitesse de rotation est constante et qui, de plus, ne se charge pas lors de la montée en vitesse [1].

✓ **Turbine bi-arbres**

Dans ce type des turbines ; la turbine de détente est décomposée en deux parties :

- La turbine à haute pression HP entraîne le compresseur d'air et lui seul par l'intermédiaire d'un arbre.
- La turbine à basse pression BP assure la fourniture d'énergie à la machine entraînée l'alternateur ou bien le générateur. [7]

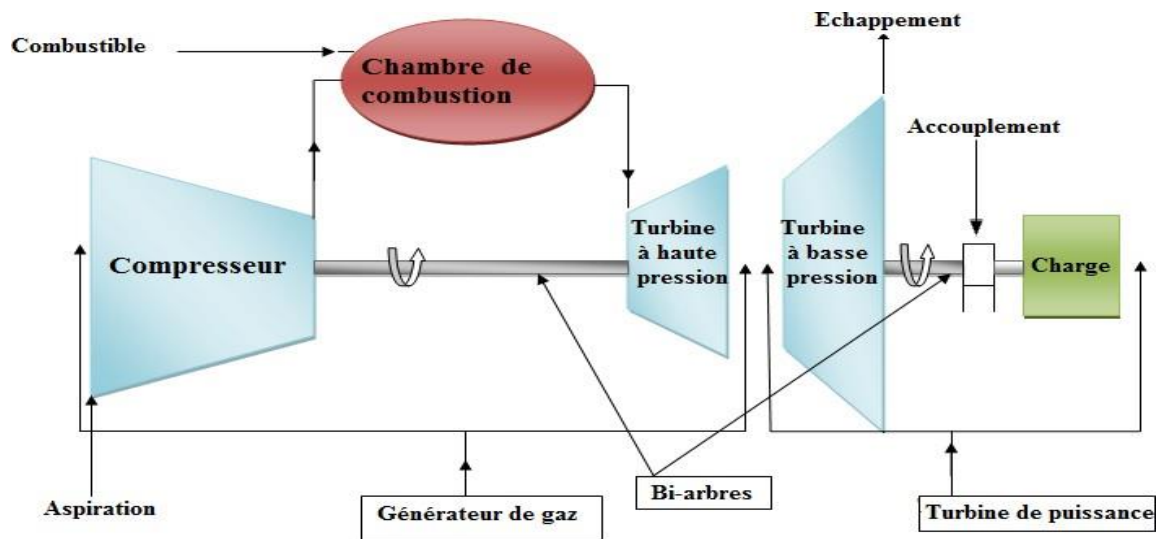


Figure (I-7) : Schéma d'une turbine à gaz bi-arbre [7].

La première ligne d'arbre constitue la génération de gaz chaud utilisé dans la deuxième ligne d'arbre pour la production d'énergie mécanique (Figure. I.7). La turbine à deux arbres est sur le plan mécanique plus complexe que la turbine à un seul arbre. Par contre, elle permet d'obtenir un meilleur rendement à charge partielle, elle s'adapte particulièrement bien à l'entraînement d'un compresseur dont la prise en charge s'effectue lors de la montée en vitesse, et permet de travailler sur une large plage de vitesse. A noter également la puissance réduite du moteur de démarrage qui n'entraîne que le premier arbre [8].

I.6.2. Selon le mode de fonctionnement thermodynamique

Les turbines à gaz à cycle ouvert dont l'aspiration et l'échappement s'effectuent directement dans l'atmosphère, ce type de turbines qui est le plus répandu se divise en deux classes : Turbine à cycle simple, et turbine à cycle avec régénération. [9]

- ✓ **Turbine à cycle simple (sans récupération)**
- ✓ Ce type des cycles est basé sur une combustion dans la chambre de combustion (air comprimé + combustible + étincelle) pour la production d'énergie thermique qui tourne la turbine de détente, cette dernière convertit l'énergie thermique en énergie mécanique. Dans ce cas, les gaz d'échappement

qui contient une quantité importante de chaleur perdue (n'est pas utilisable) déchargent vers l'atmosphère.

- ✓ **Turbine à cycle régénératif (avec récupération) :**
- ✓ Ce type des cycles repose sur la récupération de la chaleur évacuée par les fumées (les gaz d'échappement) par un échangeur de chaleur. On peut utiliser cette quantité de chaleur pour surchauffer l'air avant son entrée à la chambre de combustion comme présenté dans la Fig. I.6. [7]

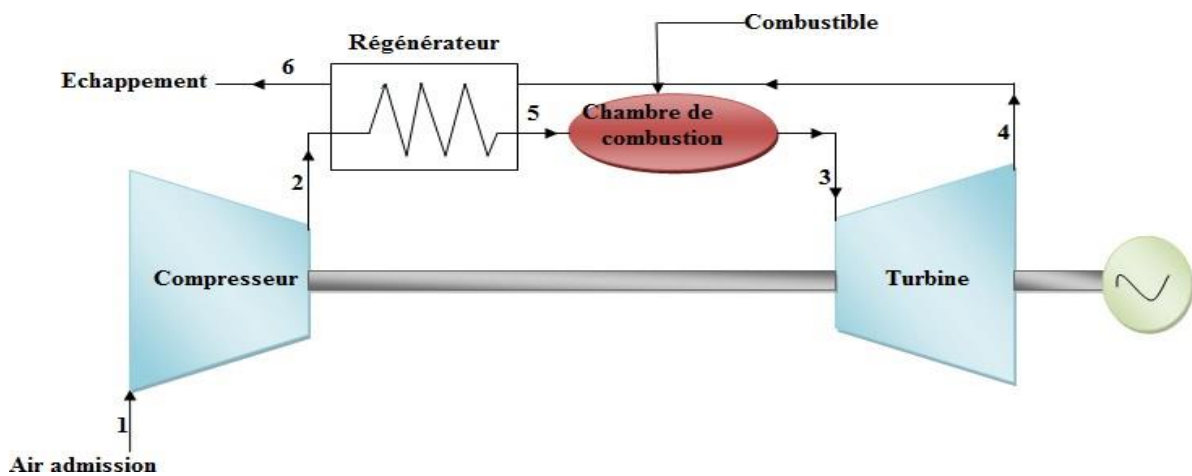


Figure (I-8) : Schéma d'une turbine à gaz avec régénération [7] .

I.6.3. Selon le mode de travail

1. Turbine à action

Dans les turbines à action, l'énergie de pression potentielle est entièrement convertie en énergie cinétique dans le distributeur. Le rotor est partiellement alimenté par un écoulement sans pression. « Partiellement alimenté » signifie que seules quelques-unes des aubes mobiles sont alimentées en même temps par le jet [10].

2. Turbine à réaction

Dans les turbines à réaction, la pression à l'entrée du rotor est plus élevée qu'à sa sortie. La transformation de l'énergie de pression a lieu à la fois dans le distributeur et dans le rotor. L'énergie cinétique est ensuite convertie en travail mécanique dans le rotor. Le rotor est intégralement alimenté par l'écoulement (Figure I.8). «

Intégralement alimenté » signifie que le périmètre complet des rotors est traversé par le milieu de travail [10].

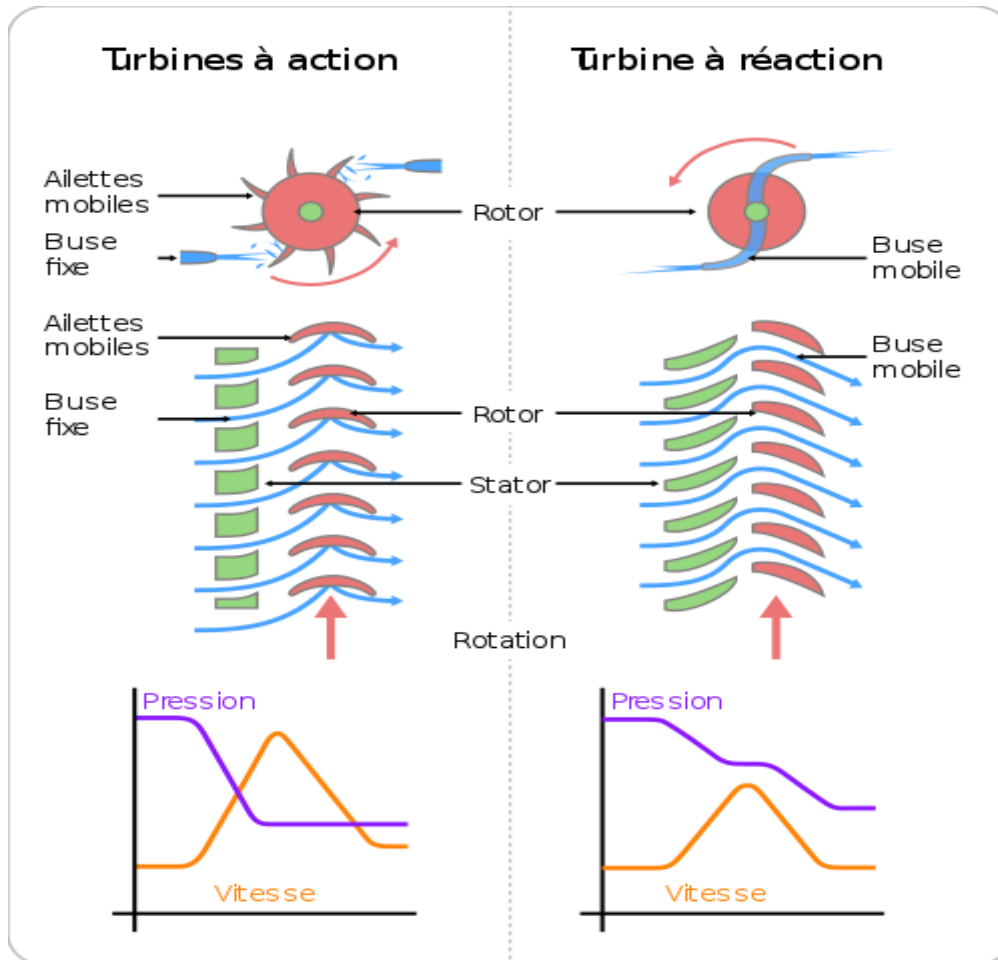


Figure (I-9) : Schéma d'une turbine à action et à réaction [10].

I.7. Principe de fonctionnement de la turbine à gaz

Une turbine à gaz fonctionne de la façon suivante : [11].

- a. elle extrait de l'air du milieu environnant (aspiration) .
- b. elle le comprime à une pression plus élevée par le compresseur (compression).
- c. elle augmente le niveau d'énergie de l'air comprimé en ajoutant et en brûlant le combustible dans une chambre de combustion (gaz chaud) .
- d. elle achemine de l'air à pression et à température élevées vers la section de la turbine, qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique pour faire

tourner l'arbre (expansion) ; ceci sert, d'un côté, à fournir l'énergie nécessaire pour la compression de l'air, qui a lieu dans un compresseur relié directement à la section turbine et, de l'autre côté à fournir l'énergie utile à la machine conduite, couplée avec la machine au moyen d'un accouplement comme par exemple un alternateur ou un compresseur centrifuge .

- e. elle décharge à l'atmosphère les gaz à basse pression et température résultant de la transformation mentionnée ci-dessus (échappement). [11]

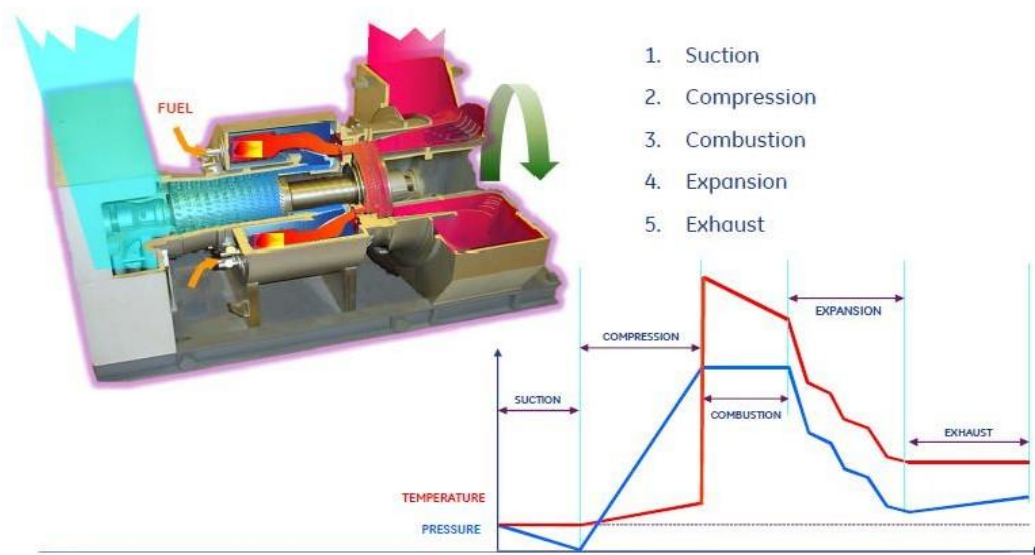


Figure (I-10) : La variation de la pression et de température dans les différentes sections de laTAG aux phases de fonctionnement [8].

I.8. Applications des turbines à gaz

On peut utiliser les turbines à gaz TAG dans le domaine aéronautique civil et militaire pour la propulsion des avions, et la propulsion ferroviaire ; dans la marine pour la propulsion des navires, et aussi dans le domaine des armes; Elles sont actuellement et de façon croissante, utilisées dans des applications industrielles, Ce dernier domaine est en pleine évolution Figure(I-10).

Les principales applications industrielles sont [12] :

- Production d'électricité.
- Applications mécaniques de pompage.

- Compression pour l'industrie du gaz ou du pétrole.
- Utilisation des gaz chauds en cycles combinés.

- Puissance disponible :

La puissance disponible sur l'arbre de la turbine est déterminée par la formule suivante :

$$W_{disp} = W_{nom} \cdot K_n (1 - K_t (T_{ad} - T_{st}) / T_{ad}) \cdot (P_{ad} / 1.01325) \quad (10)$$

N_{nom} : représente la puissance nominale donnée par le constructeur.

K_n : coefficient caractérisant l'état technique de la turbine .

K_t : coefficient tenant compte de la température de l'air .

T_{ad} : température d'admission de l'air dans le compresseur axial

T_{st} : temperature aux conditions standards (15 °C).

P_{ad} : pression d'admission de l'air dans le compresseur axial qui dépend de l'altitude où se trouve la turbine.

En général $K_n = 0.95$ $K_t = 3.7$ pour une turbine neuve

La température d'admission du compresseur axial de la turbine à gaz est égale à la température atmosphérique de l'air majeure de l'écart maximale de température moyenne ($\delta_t \equiv 1.5^\circ\text{C}$) et de l'augmentation de la température à cause d'échange de chaleur de l'échappement de la turbine avec l'air libre ($\delta_c \equiv 2.5^\circ\text{C}$) donc :

$$T_{ad} = \delta_t + \delta_c \rightarrow T_{ad} \equiv T_{amb} + 4^\circ\text{C} \quad (11)$$

- Quantité de gaz combustible

La quantité de gaz combustible consommée par la turbine est donnée par la formule :

$$q_{gc} = q_{gc}^{nom} \cdot K_g (0.75(W^{abs} / W^{nom}) + 0.25(T_{ad} / 288)^{0.5} \cdot (P_{ad} / 1.033)) \quad (12)$$

$$q_{gc}^{nom} = 3600 W^{nom} / \eta^{nom} \cdot PCI \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (13)$$

q_{gc}^{nom} : consommation nominale en gaz combustible par la turbine.

K_g : coefficient tenant compte de la variation de l'unitaire en fonction de l'état technique de la turbine.
Pour une turbine neuve $K_g \equiv 1.03$ consommation.

N^{nom} : puissance nominale de la turbine.

PCI : pouvoir calorifique inférieur du gaz (aux conditions standards $PCI \equiv 8000 \text{ Kcal/m}^3$).

η^{nom} : rendement nominal (26% sans récupération de chaleur et de 32% avec récupération).

- Rendement de turbine à gaz est

$$\eta_{tg} = \frac{3600 \times W_{nom}}{q_{GC} \times PCI} \quad (14)$$

I.9. Avantages et inconvénients des turbines à gaz

I.9.1. Avantages

Une puissance élevée dans un espace restreint dans lequel un groupe diesel de même puissance ne pourrait pas être logé.

A l'exception de démarrage et arrêt, la puissance est produite d'une façon continue. Démarrage facile même à grand froid.

Possibilité de fonctionnement à faible charge. [9]

I.9.2. Inconvénients

Au-dessous d'environ 3000 KW, prix d'installation supérieur de celui d'un groupe diesel.

Rendement inférieur à celui d'un moteur diesel (cycle simple). A titre indicatif : 28 à 33 % pour une turbine de 3000 KW, 32 à 38 % pour un groupe diesel. [9]

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités concernant les turbines à gaz. Une description fonctionnelle, une classification selon les divers critères utilisés et une chronologie de développement des turbines à gaz, ont été détaillées, et un comparatif entre avantages et inconvénients de ces installations.

Chapitre II :

Turbine à vapeur

II.1. Introduction

Une turbine est un dispositif rotatif destiné à utiliser la force d'un fluide (eau, vapeur, air, gaz de combustion) dont le couple est transmis au moyen d'un arbre.

L'énergie du fluide, caractérisée par sa vitesse et son enthalpie est partiellement convertie en énergie mécanique pour entraîner un alternateur, une pompe ou tout autre récepteur mécanique rotatif.

Il existe plusieurs types de turbines, à savoir turbine à vapeur, turbine hydraulique, turbine à gaz combustible, turbine à air. [13].

II.2. Turbine à vapeur

II.2.1. Définition

La turbine à vapeur est un des matériels stratégiques des installations de production d'énergie électrique. Son indisponibilité entraîne la perte de la production d'énergie, contrairement à d'autres matériels (pompes alimentaires, pompes de circulation assistée, ventilateurs...) dont la redondance permet de poursuivre l'exploitation des installations soit à pleine charge, soit éventuellement à charge partielle. [7].

II.2.2. Principes généraux de fonctionnement de la turbine à vapeur

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

Ce cycle comprend au moins les étapes suivantes :

- L'eau liquide est comprimée par une pompe et envoyée vers 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.

La turbine en constitue une évolution exploitant les principaux avantages des turbomachines à savoir :

- Puissance massique et puissance volumique élevée
- Rendement améliorée par la multiplication des étages de détente

Le rendement croît avec la pression de la vapeur et avec la température de surchauffe. Cependant, l'augmentation de ces caractéristiques est limitée par la teneur en eau de la vapeur en

fin de détente. En effet, la courbe de détente peut atteindre la courbe de saturation avec formation de gouttelettes qui nuisent à l'efficacité des derniers étages de détente. La teneur en eau liquide du mélange doit être limitée à 15 ou 20 pourcent in fine, c'est la pression dans le condenseur qui fixe de ce fait les pressions et température limites admissibles. Afin d'augmenter la pression et la température malgré le problème de l'humidité en fin de détente, il est possible de renvoyer la vapeur détendue jusqu'à la saturation vers la chaudière pour procéder à une resurchauffe dans un échangeur supplémentaire.

Le cycle comprend fondamentalement deux changements d'état (évaporation et condensation).

Le diagramme de phases de l'eau permet d'envisager un cycle à un seul changement d'état par l'utilisation d'une chaudière supercritique. [13].

- Réalisation pratique

Une turbine à vapeur est constituée d'un rotor comprenant un arbre sur lequel sont fixées des aubes et d'un stator constitué d'un carter portant des déflecteurs fixes, généralement constitué de deux parties assemblées selon un plan axial. Elle comprend en outre un tore d'admission segmenté et un divergent d'échappement dirigé vers le condenseur.

La fonction des déflecteurs fixes est d'assurer tout ou partie de la détente en formant un réseau des 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 [13].

Les turbines à vapeur se classent en deux grandes catégories souvent combinées dans une même machine :

• Turbine à action

La forme la plus simple de turbine à vapeur est la turbine à action, dans laquelle les jets sont fixés sur la partie intérieure de l'enveloppe de la turbine, et les ailettes placées sur le bord des roues tournantes montées sur un arbre central. La vapeur se déplaçant dans une tuyère fixe passe sur les ailettes incurvées, qui absorbent une partie de l'énergie cinétique de la vapeur dilatée, faisant ainsi tourner la roue et l'arbre sur lesquels elles sont montées. Cette turbine est conçue de manière à ce que la vapeur entrant par une extrémité de la turbine se dilate à travers une

succession de tuyères jusqu'à ce qu'elle ait perdu la majeure partie de son énergie interne.

• Turbine à réaction

Dans la turbine à réaction, une partie de l'énergie mécanique est obtenue par l'impact de la vapeur sur les ailettes. La partie la plus importante est obtenue par l'accélération de la vapeur lors de son passage dans la roue de la turbine, ou elle se dilate.

Une turbine de ce type se compose de deux jeux d'ailettes, l'un fixe, l'autre mobile. Ces ailettes sont disposées de telle façon que chaque paire joue le rôle de tuyère, à travers laquelle la vapeur se dilate lors de son passage. Dans chaque étage, une faible quantité d'énergie thermique est convertie en énergie cinétique.

La vapeur se détend dans les aubes fixes, puis entraîne les aubes mobiles disposées sur la roue ou le tambour de la turbine. Les ailettes d'une turbine à réaction sont en général montées sur un tambour, qui fait alors office d'arbre.

Les turbines à réaction nécessitent en général davantage d'étages que les turbines à action, Il a pu être démontré que, pour le même diamètre et la même gamme énergétique, une turbine à réaction a besoin de deux fois plus d'étages pour obtenir un rendement maximal. Les grosses turbines, qui sont généralement à action, utilisent une certaine réaction à la base du trajet de vapeur pour assurer en débit efficace à travers les aubes. Nombre de turbines, qui sont normalement à réaction, disposent d'un premier étage de commande d'impulsion, qui permet d'envisager la réduction du nombre total d'étages nécessaires. Les arbres des turbines de chaque étage sont reliés entre eux au moyen d'accouplements [13].

Génération électrique

Du fait de leurs caractéristiques, Les turbines à vapeur sont très employées dans les centrales thermiques de moyenne et forte puissance, y compris nucléaires. Dans la gamme de puissance de 1 à 10 MW et elles sont utilisées pour d'autres applications [13].

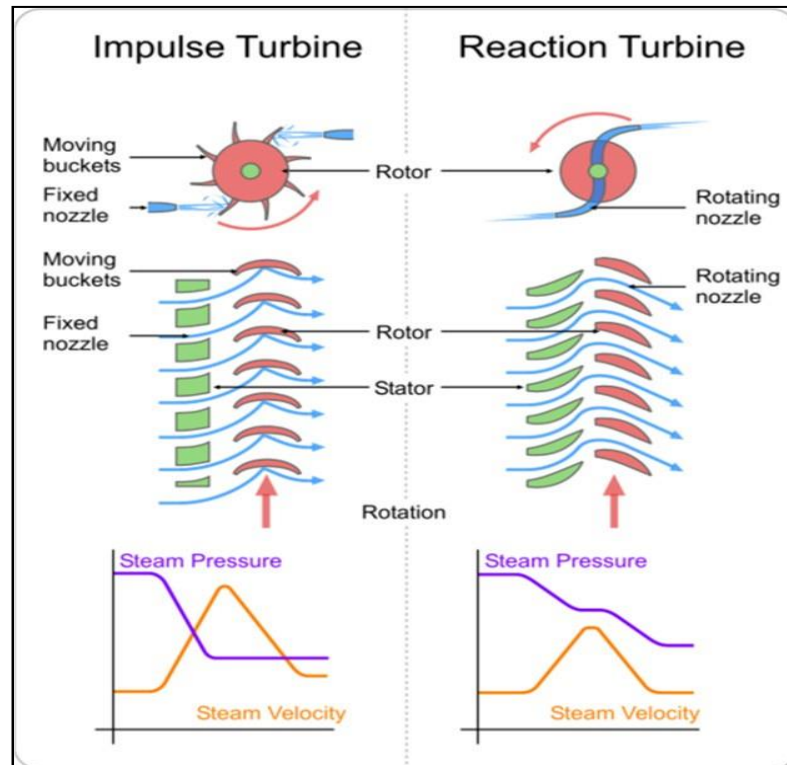


Figure (II-1) : Schéma d'une turbine à action et turbine à réaction Tirée de Emoscopes (2006) [13].

II.2.3. Types des turbines à vapeur

Les turbines à vapeur sont classées selon les conditions de la vapeur à l'évacuation, soit des types à condensation ou sans condensation. Dans les turbines à condensation, la vapeur d'admission est habituellement surchauffée pour minimiser la condensation à l'intérieur de la turbine et la vapeur d'échappement est à une pression inférieure à la pression atmosphérique. La faible pression d'échappement est produite par un échangeur de chaleur externe qui refroidit la vapeur et la condense alors qu'elle s'échappe de la turbine.

Dans les turbines sans condensation, quelquefois appelées turbines à contrepression, la vapeur d'échappement est égale ou supérieure à la pression atmosphérique. Comme la vapeur d'admission est souvent à la pression et à la température de saturation, on obtient un mélange de vapeur et de condensat, soit une vapeur humide à l'échappement. [14].

II.3. Les principaux composants des turbines à vapeur

➤ **Alternateur**

L'alternateur est une machine électrique du type génératrice à courant alternatif qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Il est entraîné par la turbine [13].

➤ **Transformateur principal (TP)**

L'évacuation de l'énergie produite par l'alternateur est évacuée sur le réseau haute tension à travers un transformateur principal élévateur : 13800V/63000V, un disjoncteur 63 KV (disjoncteur 52), trois câbles souterrains à pression d'huile et une ligne triphasée aérienne.

➤ **Transformateur de soutirage (TS)**

Les auxiliaires du groupe sont alimentés à travers un transformateur de soutirage (TS) abaisseur : 13800V/6300V en service normal et un transformateur de démarrage (TD) abaisseur : 63000V/ 6300V en secours. [13]

➤ **Chaudière**

Le rôle du générateur de vapeur est d'extraire l'énergie calorifique du combustible pour la céder à l'eau et produire de la vapeur à des paramètres fixés. Il constitue la source chaude du cycle thermodynamique. Cette vapeur sera utilisée par la turbine pour fournir de l'énergie mécanique [13].

➤ **Condenseur**

Afin de maximiser le rendement de la turbine à vapeur, la pression et la température de la sortie de vapeur doivent être aussi basses que possible. Pour cela, la vapeur qui sort de la turbine est dirigée vers le condenseur où elle est refroidie et condensée. Le condenseur est un échangeur de chaleur avec des milliers de tubes dans lesquels l'eau du circuit de refroidissement circule. La vapeur circule sur les tubes et se condense au contact de ceux-ci. L'eau du circuit de refroidissement extrait alors la chaleur de la vapeur. [13]

➤ **Pompe alimentaire**

La pompe KSB à très haute pression est une pompe à centrifuge multicellulaire. Elle comprend un corps d'aspiration, un corps de refoulement et un certain nombre d'étages ou de cellules assemblées par des tirants.

L'eau, provenant de la bache alimentaire à la pompe, possède une énergie de pression et une énergie cinétique qui seront augmentées dans les turbines en mouvement pour alimenter le générateur de vapeur (chaudière) en quantité nécessaires d'eau pour maintenir le niveau normal [13].

SCHEMA D'UNE TURBINE A VAPEUR

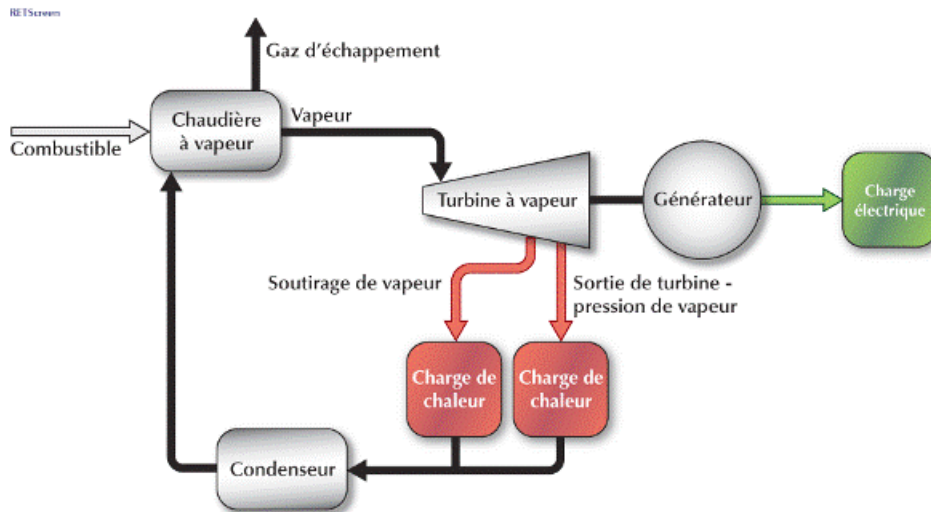


Figure (II-2) : Schéma de la turbine à vapeur [13]

II.4. Fonctionnement

Bien que les turbines à vapeur soient construites selon deux principes différents (à action ou à réaction, leurs éléments essentiels sont similaires. Elles se composent de tuyères ou de jets, et d'ailettes. La vapeur s'écoule dans les tuyères, dans les quelles elle se dilate. Ainsi, sa température diminue et son énergie cinétique augmente. La vapeur en mouvement exerce une pression contre les ailettes, entraînant leur rotation.

La disposition des jets et des ailettes, fixes ou stationnaires, dépend du type de turbine. À la sortie du dernier condenseur (échangeur thermique), l'eau peut être de nouveau vaporisée et surchauffée. L'eau ou la vapeur en sortie est alors ramenée vers la chaudière et la pompe alimentaire, qui compresse de l'eau à l'état liquide. Il s'agit d'une turbine auxiliaire intégrée au cycle thermodynamique de la turbine principale utilisant de la vapeur soutirée dans celle-ci.

Les turbines à vapeur possèdent toutefois un équipement annexe, nécessaire à leur fonctionnement. Parmi celui-ci, un palier de tourillon supporte l'arbre et un palier de butée le positionne de manière axiale. Un système d'huile assure le graissage des paliers ; des joints réduisent les pertes de vapeur tout au long de son trajet. Enfin, un système d'étanchéité empêche la vapeur de s'échapper à l'extérieur de la turbine et l'air d'y entrer. La vitesse de rotation est commandée par des soupapes situées aux entrées d'admission de la machine et pilotées par des

systèmes de régulation électroniques ou mécaniques. Les turbines à réaction développent une poussée axiale considérable, du fait de la chute de pression sur les ailettes mobiles. Cette poussée est généralement compensée par l'utilisation d'un piston d'équilibrage.

La turbine à vapeur utilise des principes thermodynamiques. Lorsque la vapeur se dilate, sa température et donc son énergie interne diminuent. Cette réduction de l'énergie interne s'accompagne d'une augmentation de l'énergie cinétique sous la forme d'une accélération des particules de vapeur. Cette transformation rend une grande partie de l'énergie disponible. Ainsi, une réduction de 100 kJ de l'énergie interne, du fait de la dilatation, peut provoquer un accroissement de la vitesse des particules de vapeur de l'ordre de 2 800 km/h. À de telles vitesses, l'énergie disponible est importante. Lorsque la pression de la vapeur d'eau en sortie de la turbine est égale à la pression atmosphérique, la turbine est dite à condensation.

Aujourd'hui, les turbines à vapeur sont généralement limitées à une température maximale de 580 °C dans le premier étage, et à une pression maximale d'admission de 170 à 180 bars [13].

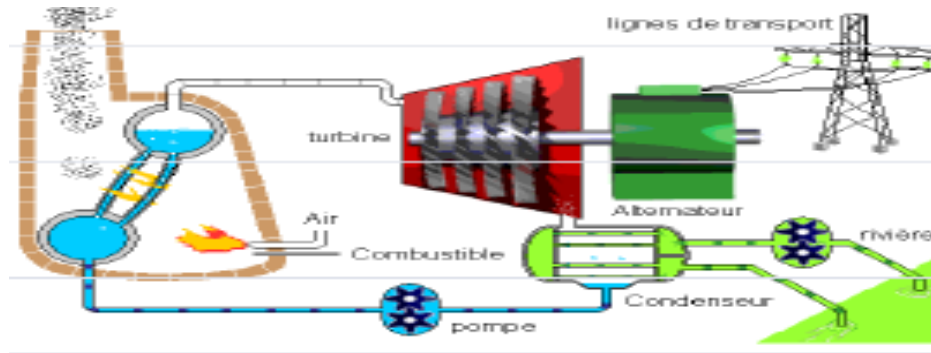


Figure (II-3) : principe de fonctionnement d'une turbine à vapeur [13].

II.5. Classification des turbines à vapeur

Les turbines à vapeur sont classées en fonction de différents critères selon Avallone (1996) :

1- Selon le nombre d'étages :

- Turbine à un seul étage, ce sont des turbines utilisées pour des petites et moyennes puissances (utilisée dans des applications industrielles).
- Turbine à plusieurs étages dans lesquels la demande de puissance est élevée. Il est intéressant de noter que leur efficacité est très grande (utilisée dans les services d'utilités comme la production d'électricité).

2- Selon la pression à la sortie de la turbine :

- Turbine à contre-pression, dans laquelle la vapeur sort de la turbine à une pression

supérieure à la pression atmosphérique, toujours avec suffisamment d'énergie capable d'être utilisée dans un procédé de réchauffement.

- Turbine à échappement : la vapeur sort à la pression atmosphérique.
- Turbine à condensation : dans ce type de turbine, la vapeur d'échappement est condensée par l'eau de refroidissement. Ces turbines sont de haute performance. [15].

3- Selon la conception d'étage de la turbine :

- Turbine à impulsion, dans laquelle la transformation est effectuée sur les pales mobiles.
- Turbine à réaction, dans laquelle la transformation est effectuée dans les deux pales fixes et mobiles.

4- Selon la direction d'écoulement dans le rotor :

- Turbine axiale, la vapeur d'eau suit l'axe de turbine. Il s'agit de la turbine la plus courante.
- Turbine radiale, le passage de la vapeur suit une direction perpendiculaire à l'axe de la turbine.

2. Selon l'état de la vapeur d'entrée :

La vapeur d'entrée est soit une vapeur surchauffée, saturée (centrales nucléaires) ou vapeur humide.

3. Turbines avec et sans extraction :

- Dans les turbines avec extraction, un flux de vapeur d'eau est extrait de la turbine avant d'atteindre l'échappement.

Le modèle de la turbine à vapeur développé dans ce mémoire est celui d'une turbine utilisée dans une centrale électrique. Conséquemment ce modèle tient compte des caractéristiques suivantes :

1. Turbine à un seul étage et à plusieurs étages.
2. Turbine à condensation.
3. Turbine à impulsion et à réaction.
4. Turbine axiale.
5. Turbine à vapeur surchauffée.
6. Turbine sans extraction. [15].

- **Configurations des turbines à vapeur**

Les turbines à vapeur peuvent être configurées de façons différentes. Une turbine à vapeur peut incorporer un seul étage haute pression (HP), un seul étage haute pression et plusieurs étages à pression intermédiaire (IP) et à faible pression (LP) ou un seul étage très haute pression (VHP). Un seul arbre ou plusieurs arbres peuvent être utilisés aussi.

Le choix de la configuration dépend du procédé où la turbine est utilisée, cogénération ou production d'électricité pure. Pour la cogénération, la pression de la vapeur est très haute lorsqu'elle est utilisée comme vapeur du procédé d'où la nécessité des sections VHP, HP, IP et LP. La pression est faible lorsque la vapeur est utilisée pour la production d'électricité, si la puissance demandée est petite on utilise juste une section HP et si elle est élevée on utilise plusieurs étages notamment HP, IP et LP

Le cycle combiné est un procédé de production d'énergie où on trouve turbine à vapeur et turbine à gaz. Une centrale à un seul arbre comprend une turbine à vapeur et une turbine à gaz entraînant une génératrice. Dans une centrale à plusieurs arbres, la turbine à gaz a son propre arbre ainsi que la turbine à vapeur. La taille du procédé et le nombre de turbines à gaz utilisées permet de décider si un seul arbre est plus économique que plusieurs arbres.

On trouve six configurations de turbine à vapeur dans l'industrie dépendamment de la taille de l'unité et des conditions de la vapeur (Byerly, 1973 ; Kundur et al., 1994).

- Turbine non composée sans réchauffeur : turbine avec une seule section haute pression HP. [15].

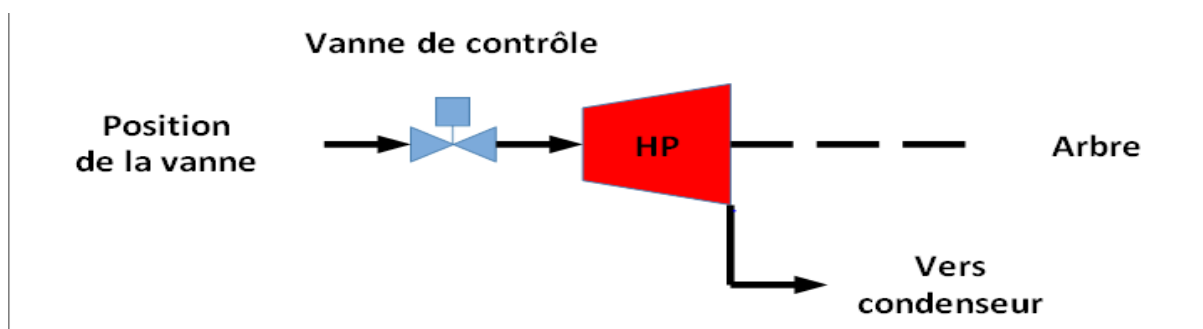


Figure (II-4) : Turbine non composée sans réchauffeur Adaptée de Byerly (1973) [15].

- Turbine composée avec un seul arbre et un réchauffeur : turbine avec une section haute pression HP, une section pression intermédiaire IP et une section basse pression LP.

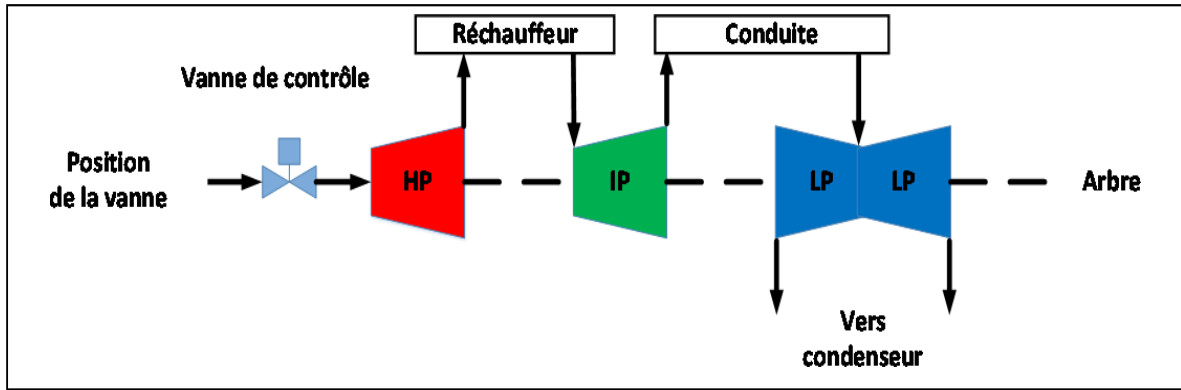


Figure (II-5) : Turbine composée avec un seul arbre et un réchauffeur Adaptée de Byerly (1973) [15].

- Turbine composée avec un seul arbre et deux réchauffeurs : turbine avec une section très haute pression VHP, une section haute pression HP, une section pression intermédiaire IP et une section basse pression LP.



Figure (II-6) : Turbine composée avec un seul arbre et deux réchauffeurs Adaptée de Byerly (1973) [15]

- Turbine composée avec deux arbres et un réchauffeur : turbine avec une section haute pression HP, une section pression intermédiaire IP et deux sections basse pression LP.

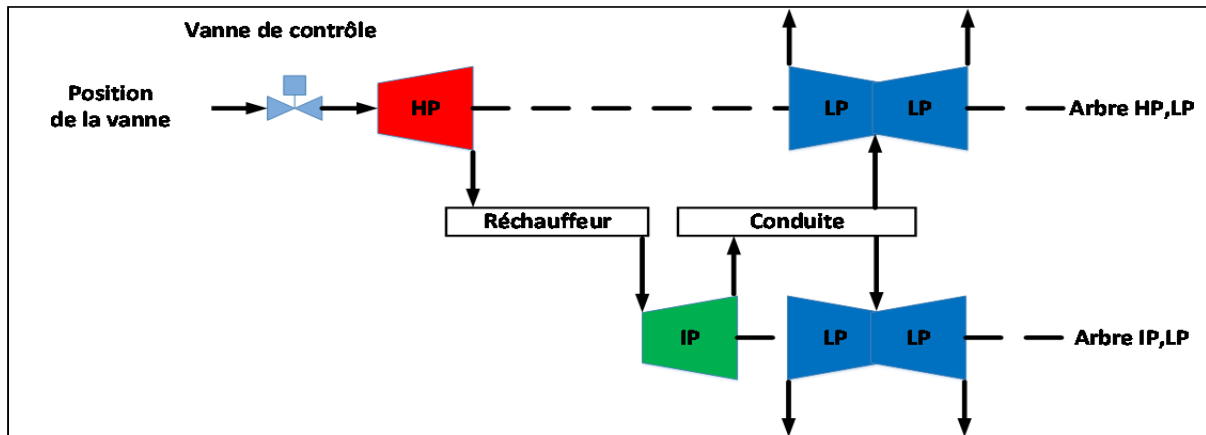


Figure (II-7) : Turbine composée avec deux arbres et un réchauffeur adaptée de Byerly (1973) [15].

- Turbine composée avec deux arbres et un réchauffeur : turbine avec une section haute pression HP, une section pression intermédiaire IP et une section basse pression LP. [15].

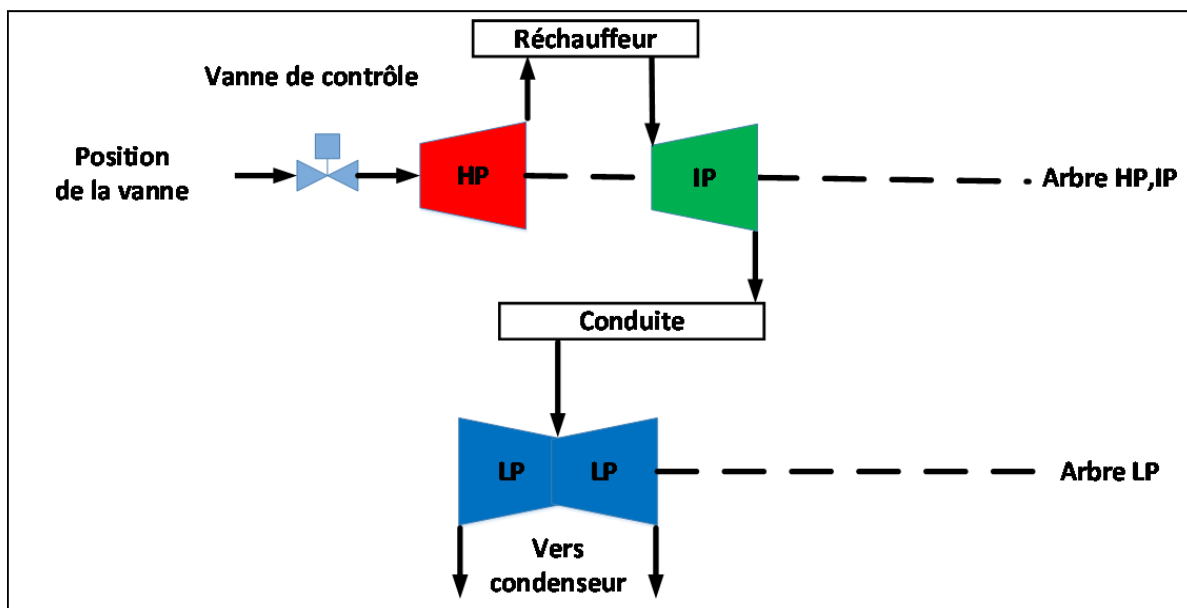


Figure (II-8) : Turbine composée avec deux arbres et un réchauffeur adaptée de Byerly (1973) [15].

- Turbine composée avec deux arbres et deux réchauffeurs : turbine avec une section très haute pression VHP, une section haute pression HP, deux sections pression intermédiaire IP et deux sections basse pression LP.

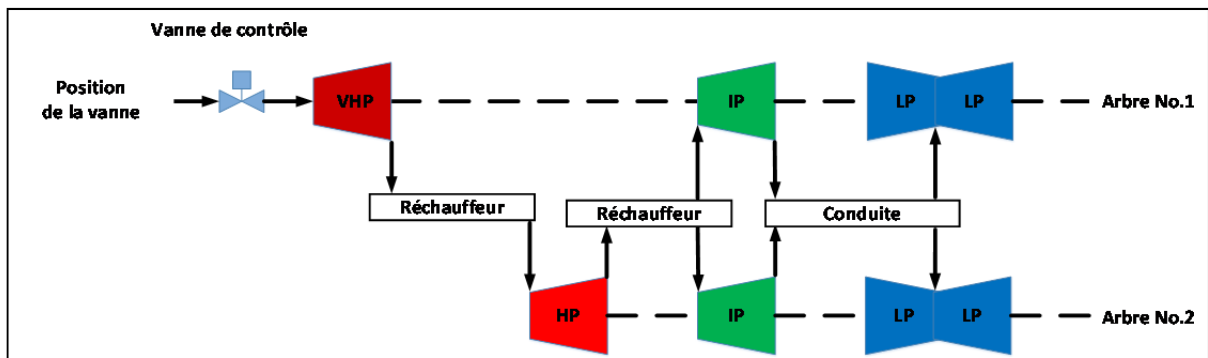


Figure (II-9) : Turbine composée avec deux arbres et deux réchauffeurs adaptée de Byerly (1973) [15].

Puisque dans le présent mémoire, une centrale de production d'électricité pure (sans besoin de produire de la chaleur tel que dans la cogénération) est simulée, la deuxième configuration « Turbine composée avec un seul arbre et un réchauffeur » est retenue en ajoutant une vanne d'interception (pour contrôler l'admission de la vapeur vers la section pression intermédiaire) (voir figure II .9). [15].

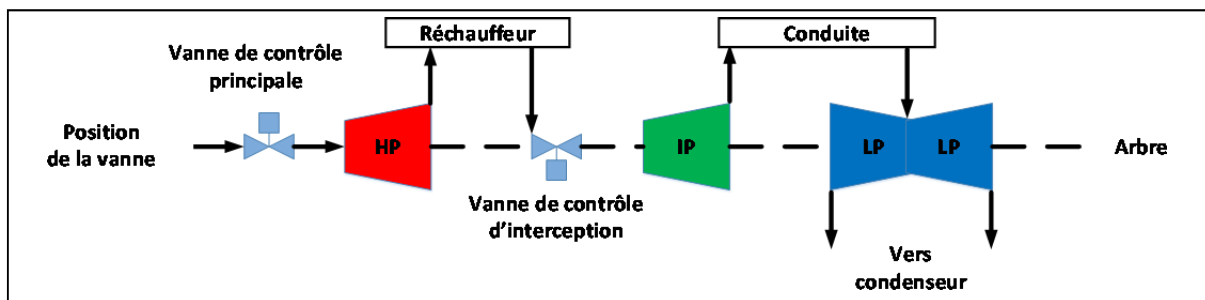


Figure (II-10) : Configuration modélisée, Turbine composée avec un seul arbre et un réchauffeur adaptée de Byerly (1973) [15].

II.6. Avantages et inconvénients des turbines à vapeur

a) Avantages

Lorsqu'une usine est bien alimentée en vapeur, l'installation de la turbine à vapeur peut être plus économique que celle de gros moteurs électriques ou de turbines à gaz. La puissance de sortie des turbines à vapeur est plus élevée que celle des turbines à gaz de taille et de consommation énergétique similaires. Lorsqu'il y a une entente avec la compagnie d'électricité. Des alternateurs électriques entraînés par turbine peuvent être utilisés pour fournir une partie de la puissance électrique d'une usine de procédés pendant les charges de pointe et

fournir de la puissance à la compagnie d'électricité à d'autres moments. La turbine et les générateurs de vapeur fonctionnent ainsi à leur maximum. De plus, la rentabilité du projet devient intéressante si les taux de l'énergie primaire sont appropriés et qu'il y a possibilité de vendre la puissance de réserve. Il existe une vaste gamme de turbine à vapeur ; certains modèles sont dotés d'arbre communs et de pompes pour répondre à des exigences industrielles et électriques. [14].

b). Inconvénients

Les turbines à vapeur présentent les désavantages suivants :

nécessité d'un apport permanent par une source de vapeur fiable de très haute qualité et du contrôle de la qualité de l'eau d'alimentation.

Possibilité d'endommager les équipements lorsque la vapeur transporte des impuretés (y compris de l'eau). [14].

II.7. Le Rendement de la turbine à vapeur

$$\eta_v = \frac{W_{uf}}{Q_v} \quad (15)$$

η_v : rendement de la turbine à vapeur

W_{uf} : travail utile fourni

Q_v :Quantité de chaleur absorbée

II.8. Conclusion

Le chapitre précédent couvre les turbines à vapeur générales et vise à présenter le principe de fonctionnement, les types et les différentes configurations, et leur utilisation varie en fonction de leur principe de fonctionnement et de leur classification. Ils sont largement utilisés pour produire de l'énergie électrique. Nous avons également remarqué qu'ils présentent de nombreux avantages par rapport aux autres moteurs thermiques, c'est pourquoi de nombreux chercheurs ont fait de nombreuses recherches pour analyser et améliorer ce type de centrale thermique.

Chapitre III :

Centrale thermique à cycle combiné

III.1. Introduction

Actuellement, plus de la moitié des besoins mondiaux en énergie électrique sont couverts par des centrales thermiques à combustion fossile. Ces dernières doivent répondre à des enjeux économiques et environnementaux de plus en plus élevés et s'adapter aux nouveaux modes de fonctionnement des systèmes de production d'énergies.

Toutes ces conditions sont remplies par les installations à cycle combiné. Elles utilisent une technologie qui permet d'obtenir un rendement nettement supérieur à celui des centrales classiques à combustion fossile, et d'assurer ainsi une diminution considérable des émissions polluantes (CO_2 et les émissions primaires telles que les SO_2 , NO_x et CO).

Les premières réalisations des centrales électriques à cycle combiné datent des années 1950 (la première centrale à cycle combiné était construite par ABB (ALSTOM POWER) en 1956), mais ce n'est que vers 1975 que cette technique a commencé son essor en parallèle avec l'évolution des turbines à gaz .

Leur développement a été accéléré par des facteurs conjoncturels (relatif à la situation du moment), comme la libéralisation du marché de l'énergie et le développement du combustible gaz naturel, associés aux qualités des centrales à cycle combiné : investissement et coûts d'exploitation réduits, haut rendement, bonne disponibilité, grande souplesse de fonctionnement, délais de réalisation courts et impact réduit sur l'environnement.

Ces centrales sont aujourd'hui appelées à jouer un rôle majeur dans la constitution du parc mondial des centrales de production d'énergie. [16].

III.2. Définition

Un cycle combiné de puissance est la juxtaposition de deux ou plusieurs cycles thermodynamiques destinés à convertir plus efficacement l'énergie fournie en travail en adaptant deux ou plusieurs fluides de cycle. Avec le développement de la turbine à gaz, le terme « cycle combiné » se réfère plus spécialement à un système composé d'une turbine à gaz, d'un récupérateur de chaleur générateur de vapeur, et d'une turbine à vapeur.

Le concept de cycle combiné a pour objectif d'augmenter le rendement global et la puissance utile d'une centrale thermique en investissant des équipements additionnels nécessités par le cycle à vapeur. Il est d'autant plus rentable que le coût de l'énergie est élevé. [17].

III.3. Centrale à cycle combiné

Le cycle combiné consiste à récupérer l'énergie thermique des gaz, très chaudes (dépassant désormais 600 °C) à l'échappement de la Turbine à combustion, pour produire, dans une chaudière de récupération, de la vapeur d'eau utilisée pour alimenter un groupe turboalternateur à vapeur. Cette solution permet une augmentation notable du rendement énergétique global de la centrale. Généralement, ce type de centrale comprend deux alternateurs, l'un entraîné par la Turbine à combustion, l'autre par la Turbine à vapeur, cependant, certaines centrales n'utilisent qu'un seul alternateur, les deux Turbines étant montées sur le même arbre. La puissance de la Turbine à vapeur étant environ 50 % de la puissance de la Turbine à combustion, des constructeurs de centrale ont installé sur certains sites deux Turbines à combustion entraînant chacune un alternateur, et une Turbine à vapeur alimentée par les deux chaudières et entraînant un troisième alternateur identique aux deux autres.

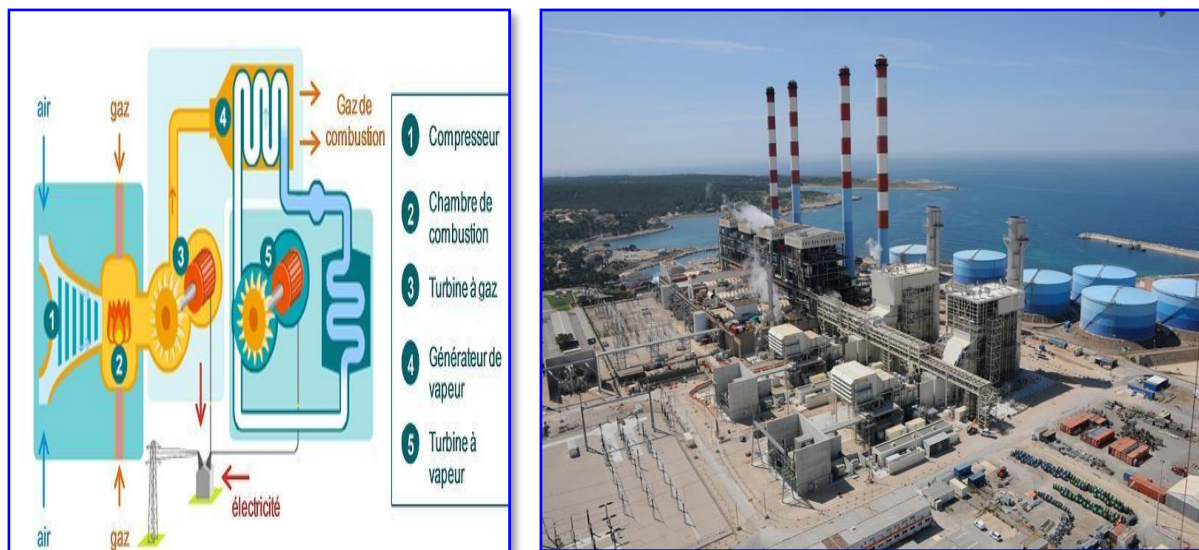


Figure (III -1) : Centrale à cycle combiné [18]

Avantage

- ✓ Moyen de production d'électricité « dispatchable » pour répondre aux variations de la demande.
- ✓ Rendement élevé par rapport à un cycle simple
- ✓ Impact environnemental réduit par rapport aux centrales thermiques à flammes
- ✓ émissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants (SOX ,NOX ,... etc.) moindres.
- ✓ Longue durée de vie (25 à 30 ans).

Inconvénients

- ✓ Émission de gaz à effet de serre.
- ✓ Coût et usure liés aux arrêts /démarrages
- ✓ Besoin d'un débouché chaleur pour la cogénération

III.4. Principe de fonctionnement

Le recours à la technologie des centrales à cycle combiné permet d'améliorer encore l'efficacité énergétique d'une centrale au gaz naturel. Ce type de centrale utilise une ou plusieurs turbines à gaz, complétées d'une turbine à vapeur, chacun entraînant une génératrice (dynamo ou alternateur) qui produit de l'électricité.

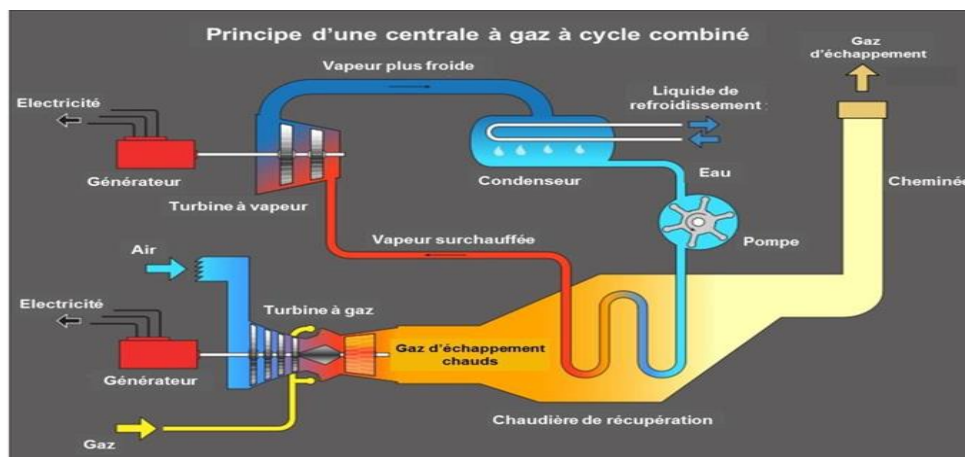


Figure (III -2) : Principe d'une centrale à gaz à cycle combiné. [19]

Chapitre III : Centrale thermique à cycle combiné

- Le gaz est injecté par les brûleurs dans la chambre de combustion, en même temps que de l'air ambiant, aspiré par le compresseur. Le mélange gazeux s'enflamme.
- Dans la chambre de combustion le volume de gaz de combustion augmente considérablement, et ceux-ci peuvent actionner les pales de la turbine à gaz.
- Les gaz de combustion quittent la turbine à gaz à une très haute température. Ils sont donc dirigés vers une 33 ecuperat de 33 ecuperation, ou ils convertissent en vapeur d'eau qui circule dans les tubes.
- La turbine à gaz est actionnée par la pression des gaz brûlants.
- La turbine à vapeur est actionnée par la vapeur qui se détend progressivement. Cette vapeur est restituée après usage, soit directement à la source, soit dirigée vers une tour de refroidissement.
- Chaque turbine actionne un alternateur qui produit de l'électricité. Le rendement énergétique de la centrale TGV se situe aux environs de 55%. [17]

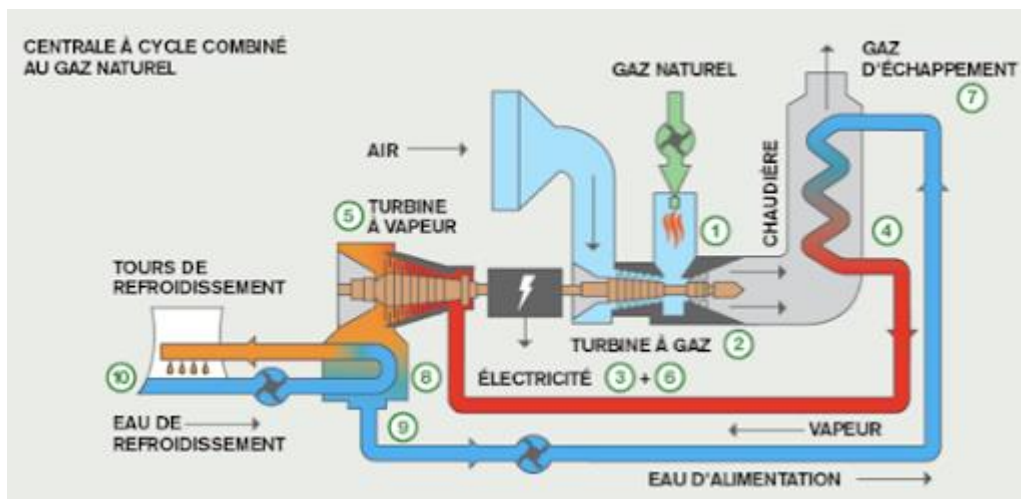


Figure (III -3) : Schéma général d'un cycle combiné [17]

III.5. Diagramme entropique d'un cycle combiné

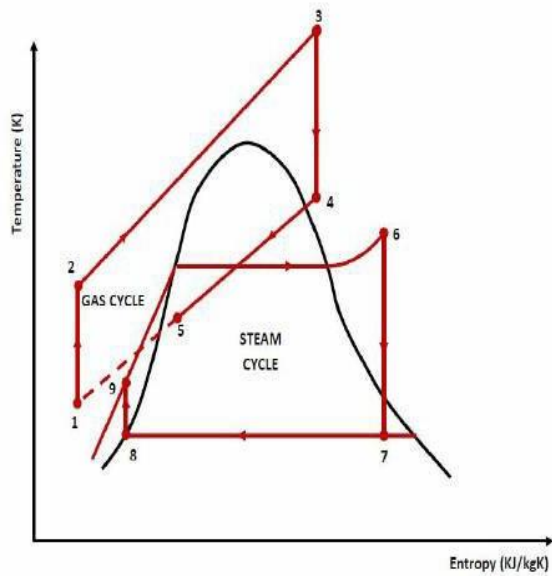


Figure (III -5) : Diagramme (T-S) d'un cycle combiné [17]

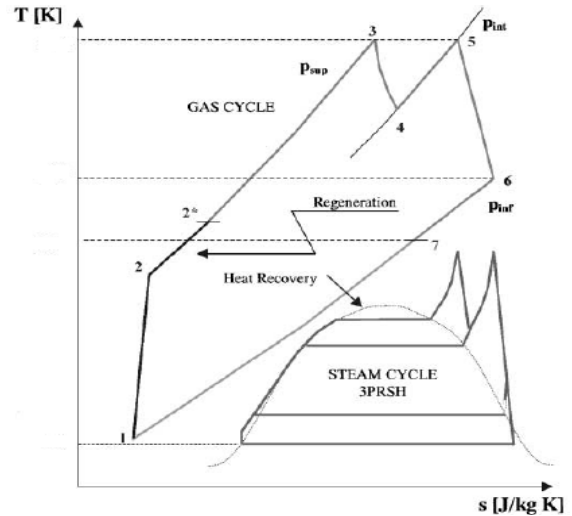


Figure (III -4) : Diagramme T-S de la TG cycle combiné [17]

Le cycle thermodynamique du cycle combiné de base se compose de deux cycles de centrales électriques. L'un est le cycle Joule ou Brayton qui est un cycle de turbine à gaz et l'autre le cycle Rankine qui est un cycle de turbine à vapeur. Le cycle 1-2-3-4-1 qui est le cycle de la centrale électrique de turbine à gaz est le cycle de remplissage. Il dépeint la chaleur et le processus de transfert de travail se déroulant dans une région à haute température.

Le cycle 5-6-7-8-9-5 qui est le cycle de vapeur de Rankine a lieu à basse température et est connu sous le nom de cycle de fond. Le transfert d'énergie thermique des gaz d'échappement à haute température à l'eau et à la vapeur se fait par une chaudière de récupération de chaleur utilisée dans le cycle de fond. Pendant le processus de pression constante 4-1, les gaz d'échappement dans la turbine à gaz rejettent la chaleur. L'eau d'alimentation, la vapeur humide et la vapeur super chauffée absorbent une partie de cette chaleur dans le processus de 5 à 6.

III.6. Cycle Combiné / La Cogénération

La cogénération consiste en la production simultanée et l'utilisation d'énergie mécanique ou électrique et de chaleur, à partir d'une seule machine et à partir d'une seule source d'énergie primaire. A l'échelle industrielle, la cogénération est réalisée dans ce qu'on appelle un cycle combiné qui est une association d'un cycle de TG et d'un cycle de turbine à vapeur. Les cycles combinés permettent d'atteindre une efficacité motrice de plus de 60 %. Les gaz d'échappement de la turbine à gaz sont valorisés dans une chaudière de récupération où l'on produit de la vapeur qui est ensuite détendue dans une turbine à condensation.

Le rendement élevé résulte de la combinaison du processus à hautes températures de turbine à gaz avec le processus à basse température de vapeur. La chaleur résiduelle des fumées chaudes a une température de 500-600°C et est transféré au processus pour la production à contre courant de vapeur. [20]

Dans un cycle combiné à gaz normal, environ deux-tiers du courant électrique est produit dans la TG et un tiers dans la turbine à vapeur de vapeur. Le cycle de l'eau est limité par la tenue mécanique de canalisation de la vapeur, et il devient coûteux de dépasser la température de vapeur de 600°C.

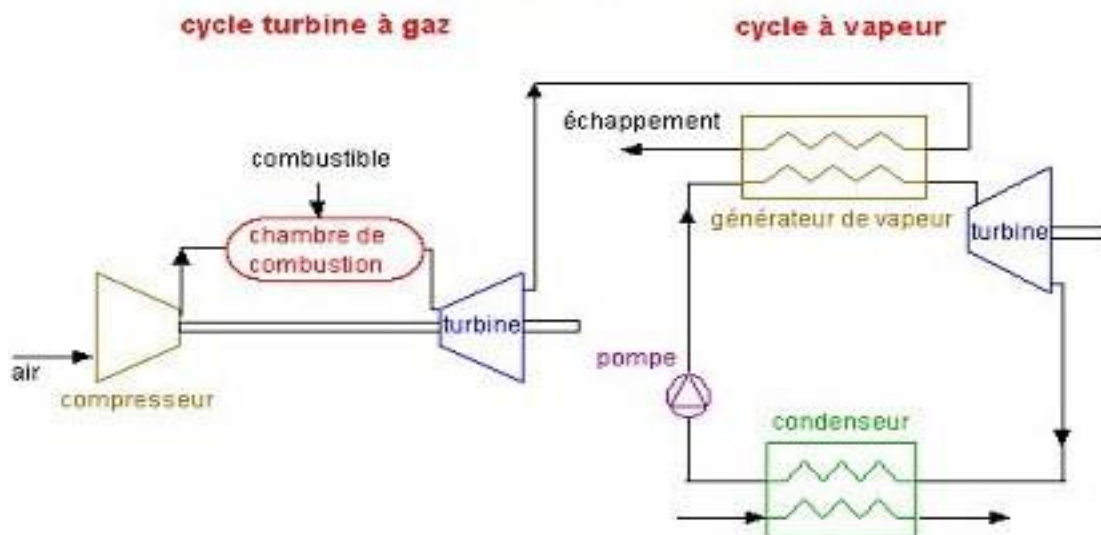


Figure (III -6) : Schéma représentant la cogénération, cas d'un cycle combiné. [20]

Les gaz conservent une température supérieure à la température ambiante ce qui constitue une irréversibilité. L'échangeur gaz / vapeur qui constitue la liaison entre les 2 cycles apporte une irréversibilité supplémentaire. Ces raisons expliquent qu'avec des différences de températures du même ordre pour chacun des cycles, la puissance de la turbine à vapeur est souvent 2 fois moins importante que celle de la TG. Sur une représentation des 2 cycles, Il faut remarquer que les masses de fluides étant différentes donc, il n'est pas possible de les représenter exactement sur le même diagramme.

III.6.1. Principe d'une installation à cycle combiné

Dans une installation à cycles combinés, le fluide de l'IMV (installation motrice à vapeur) est chauffé par les gaz d'échappement de la turbine à gaz. Le schéma de principe de l'installation est présenté sur la Fig.III.2. L'échange thermique entre les gaz de la turbine à gaz et l'eau de l'IMV a lieu dans un échangeur de chaleur appelé chaudière de récupération qui joue le rôle du (HRSG) d'une IMV. Compte tenu des niveaux de température, le cycle de base de l'IMV est un cycle de Hirn avec des soutirages. [18].

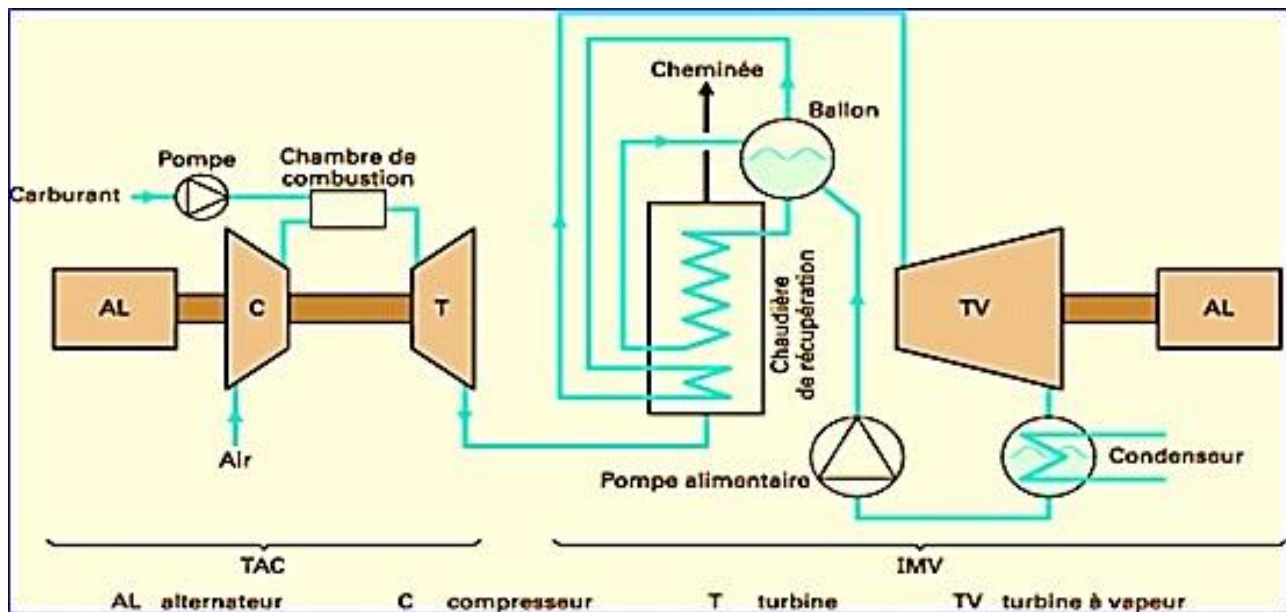


Figure (III -7) : Schéma d'une installation à cycles combinés gaz-vapeur [18].

Afin de limiter les températures atteintes en fin de combustion dans les TG, 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 post-combustion est intéressante lorsque la TG dispose d'un récupérateur de chaleur. Le schéma d'une telle installation est représenté sur la figure Fig.III.8.

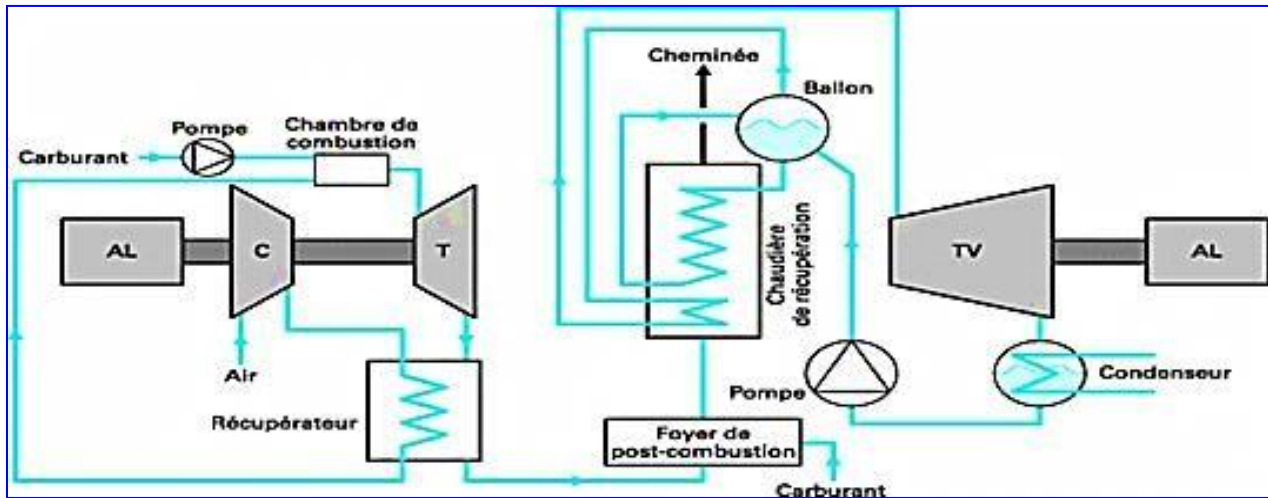


Figure (III -8) : Installation à cycles combinés avec récupérateur de chaleur et postcombustion [18].

III.6.2. Rendement du cycle combiné

Pour le cycle combiné on considère les échanges d'enthalpies suivantes : [18].

Avec : Q_g : la chaleur chaude , W_g : le travail utile , Q_c : la chaleur rejetée au condenseur

W_v : le travail utile Q_p : les pertes , Q_v : la chaleur fournie au cycle à vapeur

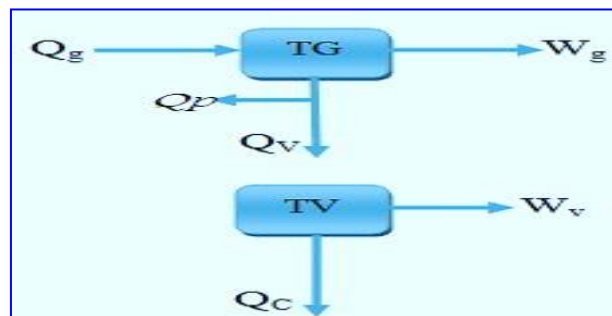


Figure (III -9) : Paramètres du rendement à cycle combiné [18].

Le rendement thermique η_{cc} du cycle combiné se calcule comme suit [18]

$$\eta_{cc} = \frac{W_g + W_v}{Q_G} = \eta_g + \frac{Q_V}{Q_g} \eta_v \quad (16)$$

η_g : Le rendement de la turbine à gaz η_v : le rendement de la turbine à vapeur

Le terme $\frac{Q_V}{Q_g}$ dans l'expression de η_{cc} peut être écrit en fonction de l'efficacité d'une chaudière de récupération η_{cR} car on a :

$$\eta_{cR} = \frac{Q_V + W_v}{Q_p + Q_V} = \frac{1}{1 - \eta_g} * \frac{Q_V}{Q_g} \quad (17)$$

D'où :

$$= \eta_g + \eta_{cR}(1 - \eta_g)\eta_v \quad (18)$$

III.6.3. Les avantages du cycle combiné

La demande de centrales à cycle combiné a considérablement augmenté durant la dernière décennie grâce à la technologie de production de vapeur et/ou d'électricité est la plus efficace sur le marché actuellement et a fait ses preuves. Il existe, cependant, d'autres raisons pour expliquer ce succès : la disponibilité du gaz et du mazout, la dépense modérée d'investissement et un délai court de construction par rapport aux centrales à cycle de Rankine.

- **Points d'amélioration** : Bien des avantages de la technologie du cycle combiné sont directement liés à ceux de la conduite de la centrale. Ces avantages sont décrits ci-dessous.

1- Le rendement : La technologie récente permet l'augmentation du rendement en conservant les niveaux élevés de disponibilité et de fiabilité. Des fabricants, comme General Electric, ont mis en œuvre des avancées dans le domaine du refroidissement et de l'aérodynamique pour faire passer le rendement de leur turbine à gaz à cycle simple à plus de 35%. [18].

1- La fiabilité : Les turbines à gaz anciennes étaient relativement peu fiables comparées aux turbines à vapeur des centrales à cycle de Rankine. Depuis le début des années 1970, la disponibilité des turbines à gaz est passée de 70%, ce qui est peu, à plus de 90%. On prévoit pour les nouveaux modèles une disponibilité de l'ordre de 95% avec un temps moyen entre pannes (MTBF) de 3000heures. Ceci est supérieur à la disponibilité de nombreuses centrales classiques à cycle de Rankine. L'amélioration de la fiabilité provient principalement de celle des matériaux et de la redondance du matériel critique "intégré à la conception", en particulier des systèmes de régulation. Intégrer la redondance à la conception garantit qu'un composant au moins reprenne en secours le fonctionnement de manière que la panne d'un seul composant n'entraîne pas une mise hors service forcée. [18].

2- La flexibilité : La turbine à gaz peut fonctionner en cycle simple ou en mode combiné. Cette caractéristique exige l'installation d'un registre et d'une cheminée de by-pass entre l'échappement de la turbine à gaz et la Chaudière de Récupération (HRSG).L'emploi d'un tel volet de contournement permet de mettre la turbine à gaz en fonctionnement alors que la partie cycle de Rankine de la centrale est à l'arrêt. La flexibilité peut être renforcée en multipliant les turbines à gaz, les HRSG et les turbines à vapeur. Cependant, cela signifie aussi une plus grande complexité. Les centrales à cycle de Rankine, équipées de chaudières à combustion, demandent souvent plusieurs heures, ou mêmes plusieurs jours, pour passer de l'état froid à celui de fonctionnement. La plus grande partie de la phase de démarrage consiste à préchauffer la chaudière et la turbine à vapeur pour éviter les contraintes thermiques et la fatigue du matériel. Comme elles fonctionnent à des pressions et des températures élevées, les centrales classiques (Cycle de Rankine) sont construites en matériaux plus lourds/plus épais conçus pour résister à ces conditions de travail. Ceci comprend :

- ✓ L'enveloppement et le rotor de la turbine
- ✓ La pente de montée en température de ces matériaux plus lourdes/plus épaisse est plus faible
- ✓ Temps pour amener la centrale à la phase de démarrage, plus long.

Les centrales à cycle combiné, construites dans des matériaux plus légers, fonctionnent à des pressions et des températures plus basses. La partie turbine à gaz d'une centrale à cycle combiné peut passer de l'état froid à la pleine charge de 10 à 20 minutes en fonction des caractéristiques de la

tranche. Les (HRSG) faites de matériaux plus légers que les chaudières classiques peuvent être amenées à la production optimale de vapeur en un temps très court. Cette flexibilité renforcée par rapport aux centrales classiques à cycle de Rankine permet de diminuer le coût homme heure et le temps d'immobilisation et d'augmenter le rapport financier du fait que la vapeur peut être produite en un temps très court [9].

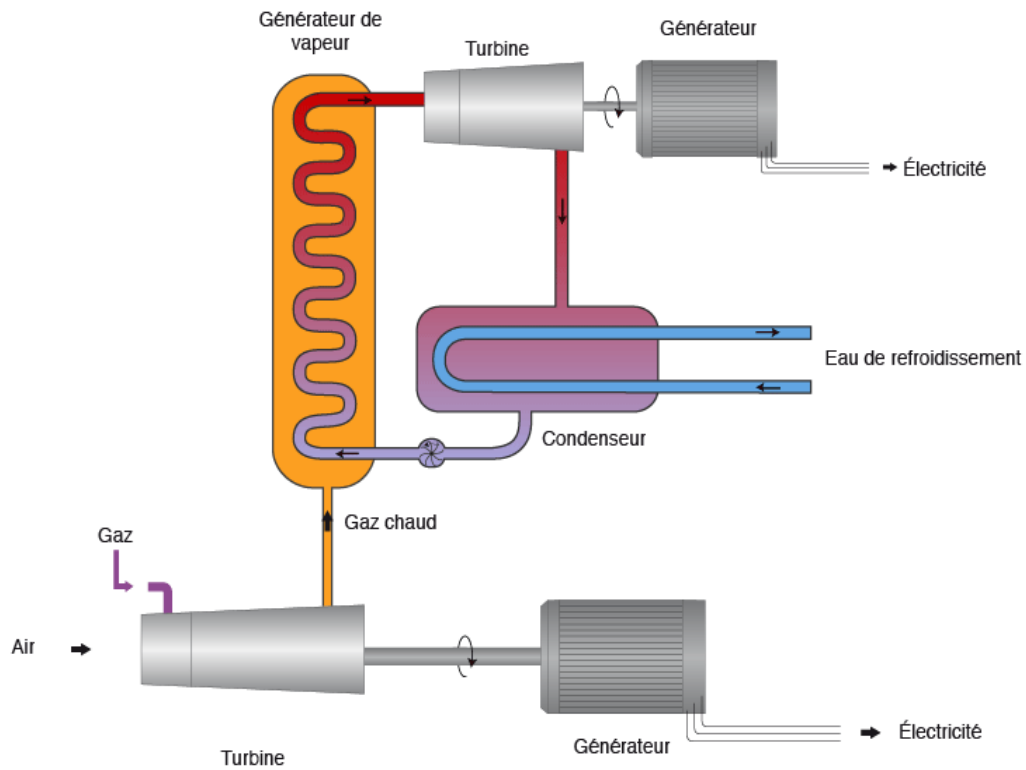


Figure (III -10) : Schéma d'un cycle combinés gaz-vapeur [18].

III.7. Conclusion

Le cycle combiné permet de récupérer de la chaleur perdue résultant de l'échappement de la turbine à gaz, ces gaz seront utilisés pour la production de l'électricité au lieu de se dégager dans l'atmosphère.

- La centrale à cycle combiné est plus respectueuse de l'environnement grâce aux performances du cycle combiné notamment la diminution de dioxyde de carbone CO₂ pour éviter le phénomène d'effet de serre, ce dernier qui provoque le réchauffement climatique.

- Les cycles combinés gaz-vapeur offrent les meilleurs rendements et les coûts les plus bas pour la production d'énergie électrique dans les installations de grande puissance (plus de 1000MW).

Pour les installations plus petites le coût de la turbine à vapeur du cycle combiné représente une part importante du coût global de l'installation. Cela nous pousse à approfondir plus dans l'étude énergétique de ces centrales à cycle combiné dans le but de maîtriser leurs technologie.

Chapitre IV :

Travail expérimental

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous parlerons brièvement de la description de la station SP1 BIS DJAMAA sur laquelle nous avons forcé notre étude pendant la période de formation, cette station sera donc présentée plus en détail.

Vu la station dispose uniquement d'une turbine à gaz et ne dispose pas d'une turbine à vapeur et par conséquent un centrale thermique à cycle combiné. on a proposé à étudier ce dernier par une simulation et par la conception d'un programme qui calcule le rendement de ce cycle.

IV.2. Description du lieu de stage pratique

IV.2.1. Présentation de la station de pompage SP1 BIS de Djemaa

La station de pompage SP1 bis Djamâa est implantée sur un terrain désertique de la vallée de l'Oued Righ appartenant à l'administration des Domaines Publics. Elle a été construite entre 1960 et 1961 puis rénovée entre 2005 et 2007, suite à la vétusté de ses installations.

La station est située, à 250 Km environ au nord de Hassi Messaoud, elle est distante d'environ 28 Km de la ville de Djamâa. Elle est accessible par la route reliant Djamâa à Morrara.

Sur la Ligne OB1 24'' HEH - BEJAIA, sa situation correspond au PK 189+800.

Localisation

- ❖ Commune / Daïra / Wilaya : Djamâa/ Djamâa/El Oued
- ❖ Adresse : BP 13 Djamâa
- ❖ Tel : 032 25 62 50
- ❖ Fax : 032 25 62 93
- ❖ Superficie : 267 800 m² . .
- ❖ Coordonnées géographiques:
 - Latitude : 33° 34' N
 - Longitude : 05° 46' E
 - Altitude : 83 m.



Figure (IV-1) : Plan de Situation SP1 bis Djamâa.

IV.2.2. Descriptif de l'environnement immédiat

La station de pompage SP1 bis Djamâa est implantée sur un terrain désertique de la vallée de l'Oued Righ appartenant à l'administration des Domaines Publics.

Les lieux protégés situés à proximité :

- ❖ La station de Pompage N°02 qui dépend des installations de la Région Transport Est Skikda distante d'environ 01 Km

IV.2.3. Description de l'activité du site

La station de pompage SP1 bis Djamâa a été mise en service en 2007 après la rénovation des anciennes installations devenues vétustes après 25 ans de fonctionnement.

La station est conçue pour transporter le pétrole brut et le condensât, par pompage, sur l'oléoduc OB1 24''/22'' de Djamâa jusqu'à la station de pompage de SP2 Biskra située à 161 Km en aval.

IV.2.4. Composantes de l'installation

Elle est composée de :

- ❖ Une zone d'installation :
 - 02 Gares de racleurs (Départ et Arrivée) (Ligne OB1 HEH/Béjaïa).

- 01 Gare racleur arrivée (Ligne Gazoduc 16'' alimentant la station SP1 bis Djamâa en gaz).
- 01 Skid gaz arrivée Gazoduc 16''
- 02 Turbo Pompes (TP).
- 02 Turbo Alternateurs.
- 01 Unité de traitement d'eau.
- 01 bac de détente de 1 000 m³
- 01 Systeme anti incendie.
- 01 Système STS
- ❖ Bloc administratif (salle de contrôle).
- ❖ Base de vie
 - 01 Restaurant
 - 01 Hôtel
 - 40 Chambres

IV.2.5. Caractéristiques techniques des installations

- ❖ Turbo-Pompes :
 - Nombre : 02
 - Machines en services : 01
 - Constructeur/modèle/type :
 - ✓ TP1 :Nuovo Pignone /GE10/GO7532
 - ✓ TP2 :Nuovo Pignone /GE10/GO7530
 - Puissance : 11 982 MW
 - Consommation : 1917Kg/h
 - Etat / Commentaires :
 - ✓ TP1 : Bon /En service
 - ✓ TP2: Arrêt / Indisponible.

IV.3. Méthodes expérimentales

Pour étudier le fonctionnement d'une centrale thermique à cycle combiné on a utilisé le logiciel « Cycle-tempo ».

Cycle-Tempo est un programme de modélisation thermodynamique et d'optimisation des systèmes de production d'électricité, de chaleur et de froid. Ce logiciel est développé à

l'Université de technologie de Delft (TU Delft) Faculté de génie mécanique, maritime et des matériaux, Section des technologies de l'énergie (Mekelweg 2 2628 CD Delft Pays-Bas).

Description du logiciel

L'écran principal figure (IV - 2) est divisé en six parties, de haut en bas :

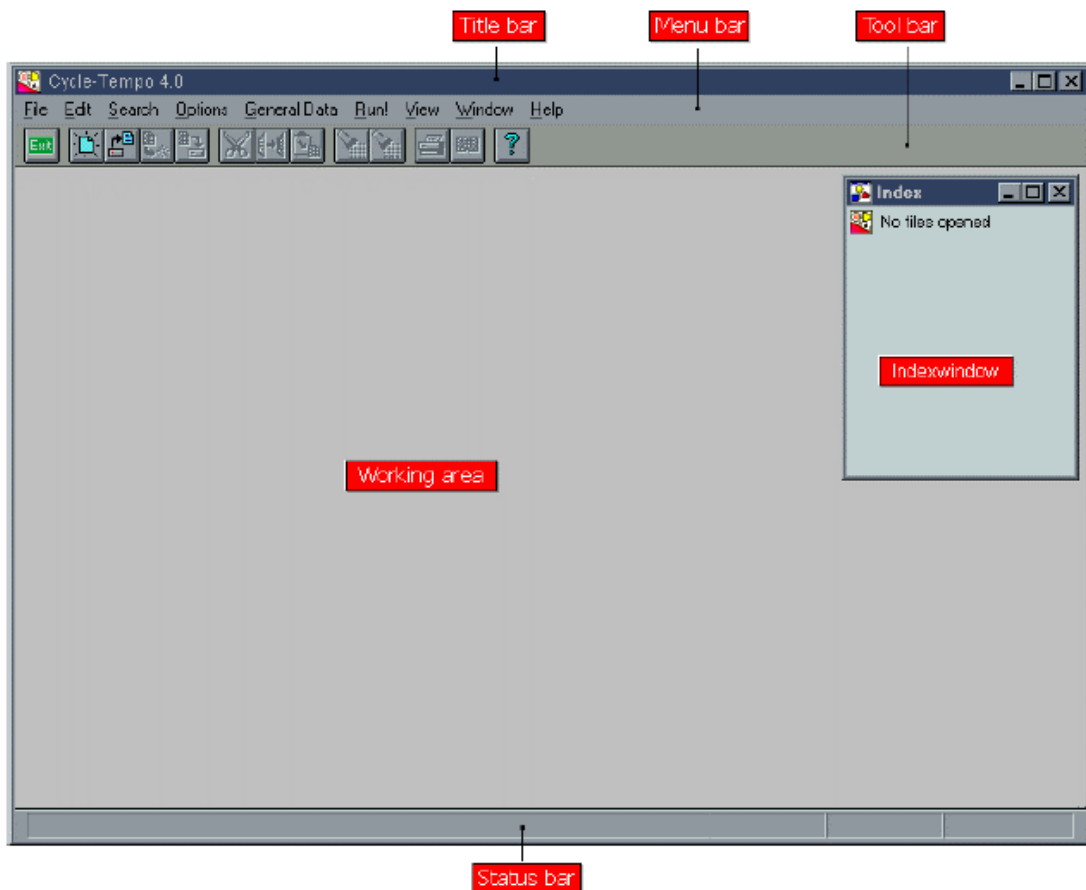


Figure (IV - 2) : L'écran principal du logiciel « Cycle-tempo ».

La zone de travail : La zone de travail comprend la plus grande partie de l'écran. Vous pouvez placer une ou plusieurs fenêtres différentes dans la zone de travail (voir Figure 1-2), par exemple:

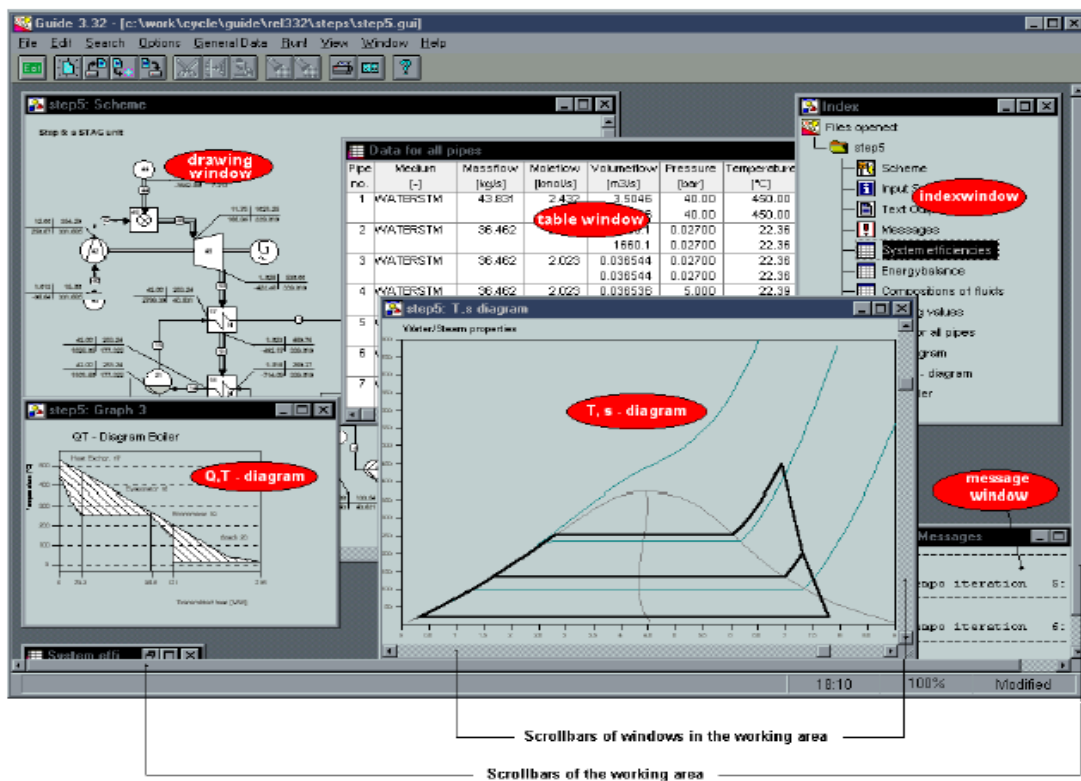


Figure (IV-3) : Zone de travail du logiciel « Cycle-tempo ».

Fenêtre de dessin.

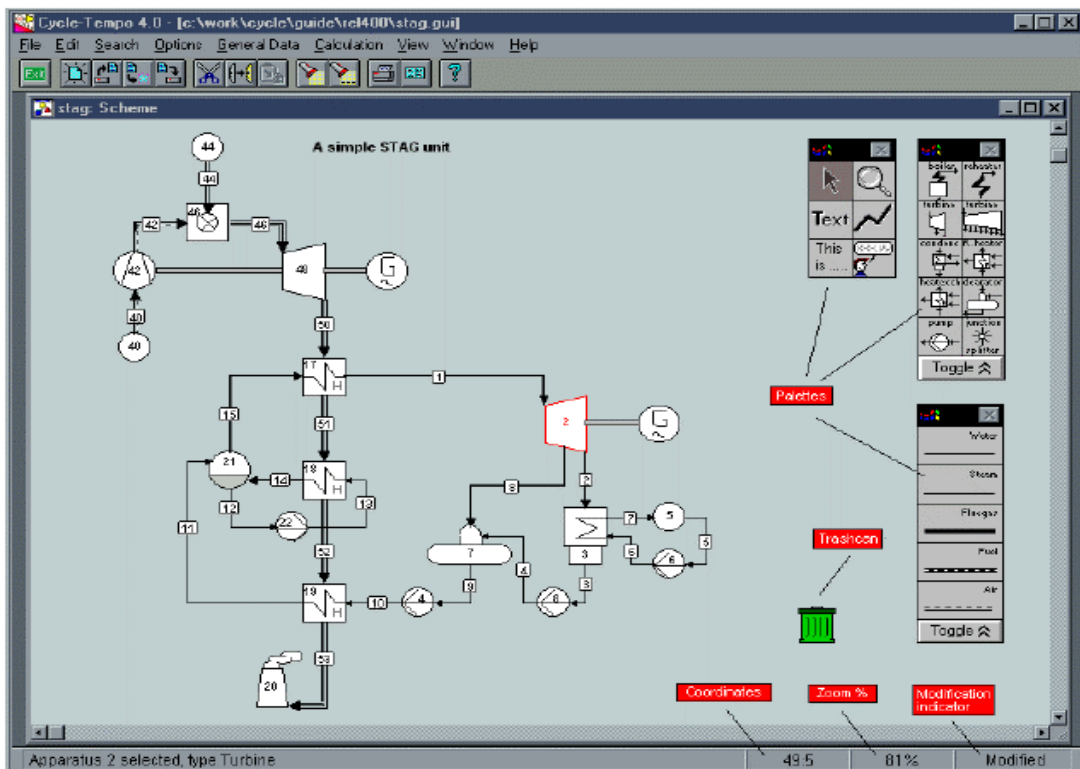


Figure (IV-4) : Fenêtre de dessin du logiciel « Cycle-tempo »

Données générales des appareils

Le tableau 2-1 donne un résumé des types des appareils disponibles dans Cycle-Tempo ainsi que les noms par défaut et le nombre d'équations système ajoutées à la matrice du système par type d'appareils.

Les paramètres généraux des appareils sont :

N° : numéro d'identification de l'appareil (numéro d'appareil). Le numéro doit être égal ou supérieur à 1, mais inférieur à 32767. Les numéros sont automatiquement attribués, mais peuvent être modifiés si désiré.

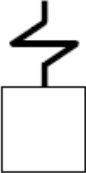

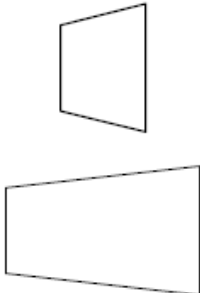
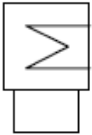

Nom = nom de l'appareil à saisir par l'utilisateur (pour les valeurs par défaut, voir le Tableau 2-1). Le nom ne doit pas dépasser 12 caractères. Les noms spécifiés sont utilisés dans des tableaux avec des résultats de calcul ou des diagrammes.


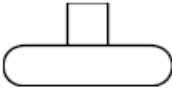








Pour presque tous les appareils, les données thermodynamiques suivantes peuvent être spécifiées :

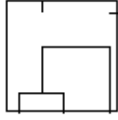
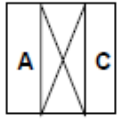

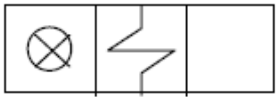



Tableau (IV-1): les données thermodynamiques de cycle tempo



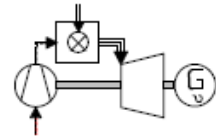


PIN	Pression d'entrée	bar
POUT	Pression de sortie	bar
DELP	Différence de pression	bar
TIN	Température d'entrée	C°
TOUT	Température de sortie	C°
DELT	Différence de Température	C°

Tableau (IV-2) : Résumé des types des appareils disponibles

Type	Default name	System equations	Symbol
1	Boiler	1M	
2	Reheater	1M	
3	Turbine	1M	
4	Condenser	2M / (EEQCOD = 2; type 6) 2M + 1E (EEQCOD = 1; type 12)	
5	Flash.Heater	2M + 1E	

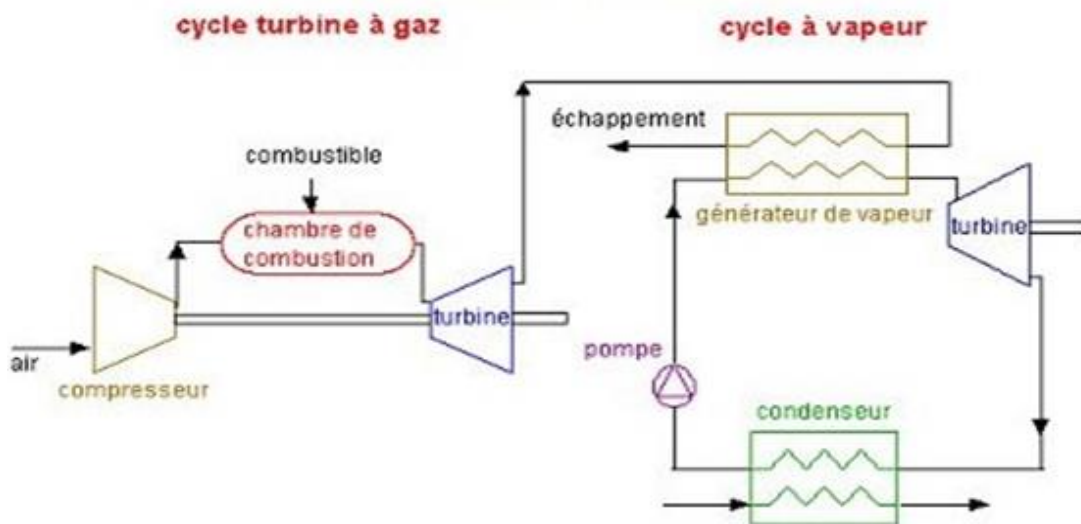
Type	Default name	System equations	Symbol
6,12	Heat Exchgr.	2M / (EEQCOD = 2; type 6) 2M + 1P (EEQCOD = 1; type 12)	
7	Deaerator	1M + 1E	
8	Pump	1M	
9,11	Node	1M / (EEQCOD = 2; type 9) 1M + 1E (EEQCOD = 1; type 11)	
10	Sink/Source	1M (in case of only 1 pipe connected then 1M only if DELM, DELV or DELVN is specified)	
10	Heat Sink	1M (in case of only 1 pipe connected then 1M only if DELM, DELV or DELVN is specified)	
10	Stack	1M (only if DELM, DELV or DELVN is specified)	
13	Combustor	1M / (EEQCOD = 2) 2M (EEQCOD = 1, or EEQCOD = 2 if LAMBDA specified) (ash pipe connected → +1M)	
14	Valve	2M	
15	Drum	1M + 1E	

Type	Default name	System equations	Symbol
20	Reformer	$2M /$ (EEQCOD = 2) $2M + 1E$ (EEQCOD = 1) (SFRATI specified \rightarrow +1M)	
21	Fuel Cell	$2M /$ (EEQCOD = 2) $2M + 1E$ (EEQCOD = 1) (cooled LTFC \rightarrow +1M) (UOX specified \rightarrow +1M) (POWER specified \rightarrow +1M)	
22	Moist. Sepr.	$2M /$ (EEQCOD = 2) $2M + 1E$ (EEQCOD = 1) (if mass flow of separated moisture is calculated: +1M)	
23	Gasifier	$2M /$ (EEQCOD = 2) $2M + 1E$ (EEQCOD = 1) (ash pipe connected \rightarrow +1M) (OFRATI or ESTOFR specified \rightarrow +1M) (SFRATI specified \rightarrow +1M)	
25	Scrubber	$2M$	
26	Separator	$2M$	
27	Reactor	$1M$	

Type	Default name	System equations	Symbol
28	Saturator	2M	
29	Compressor	1M	
30	Gas turbine	1M if a bottoming cycle is present	
G	Generator	-	
M	Electromotor	-	

IV.4. Simulation

La simulation est réalisée suivant la figure suivante (figure III. Chapitre III)



IV.4.1. Conception d'une installation d'une turbine à gaz

La turbine à gaz figure (IV- 5) est constituée d'une turbine (1), un compresseur (2) et une chambre de combustion (3)

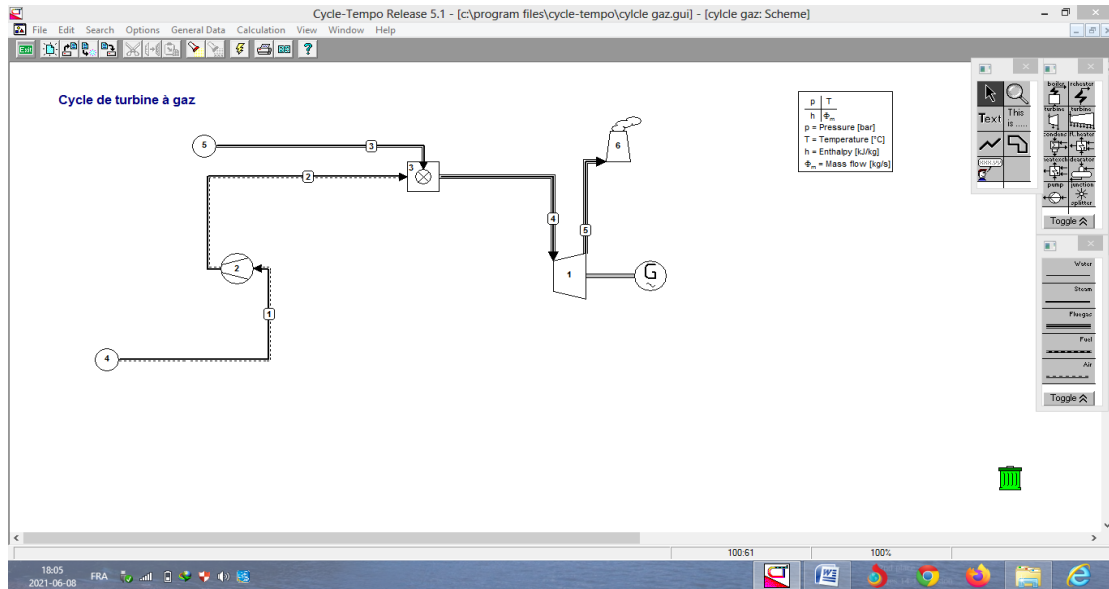


Figure (IV- 5) : Conception de la turbine à gaz

La figure (IV-6) Montre la description des appareils utilisés dans la réalisation de l'installation de la turbine à gaz.

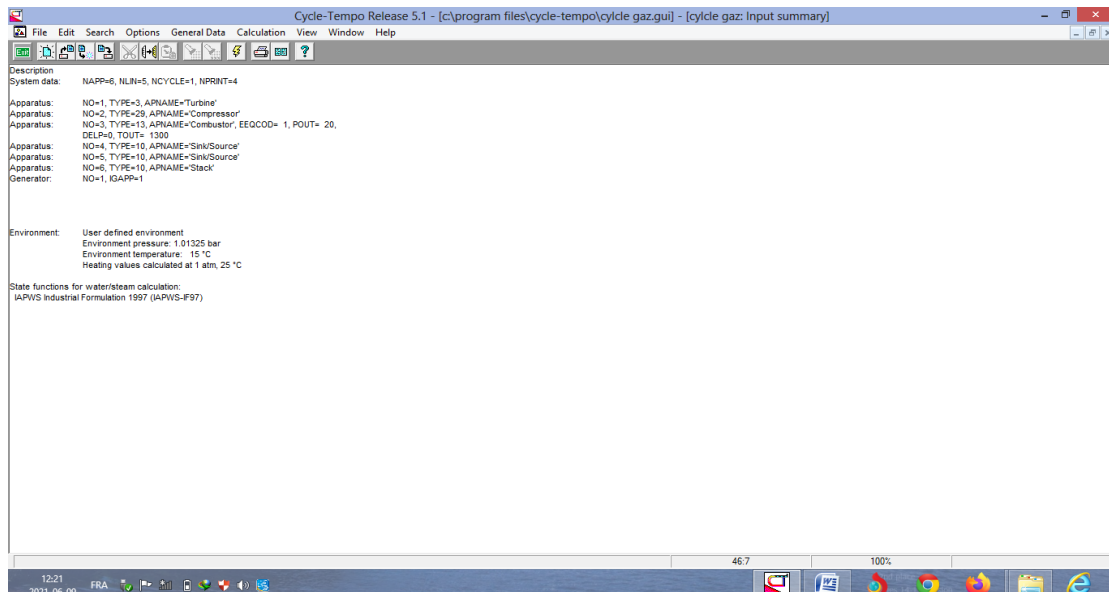


Figure (IV-6) : Description des appareils utilisés la turbine à gaz.

Les figures (IV.7 , 8 , 9 , 10 , 11 , 12 et 13) montrent les parametres des appareils utilisés dans la réalisation de l'installation de la turbine à gaz.

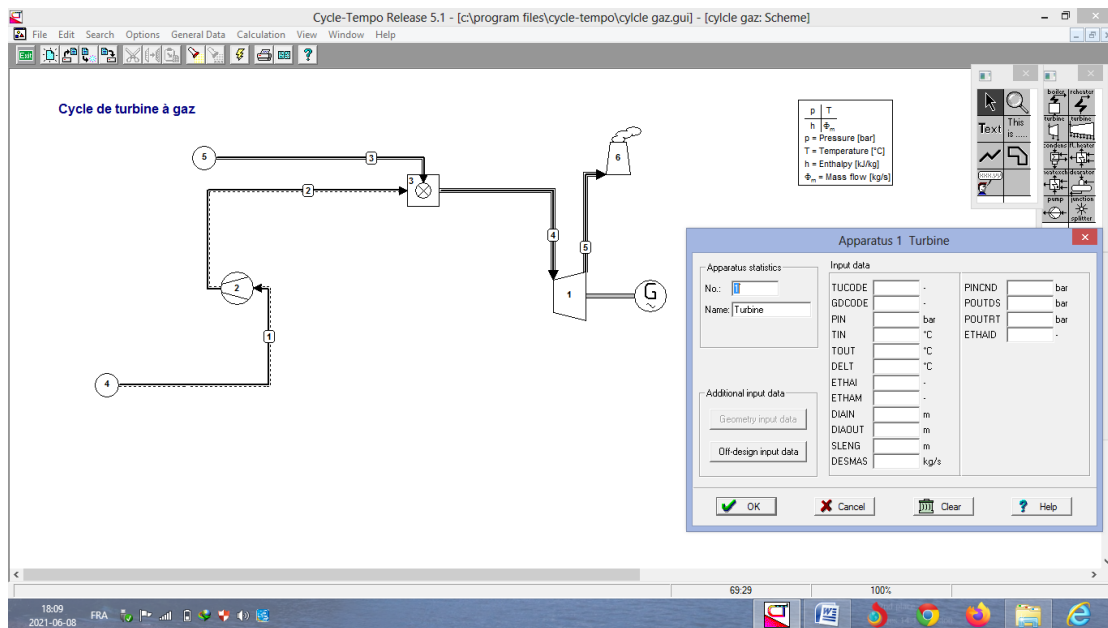


Figure (IV-7) : Paramètres de la turbine

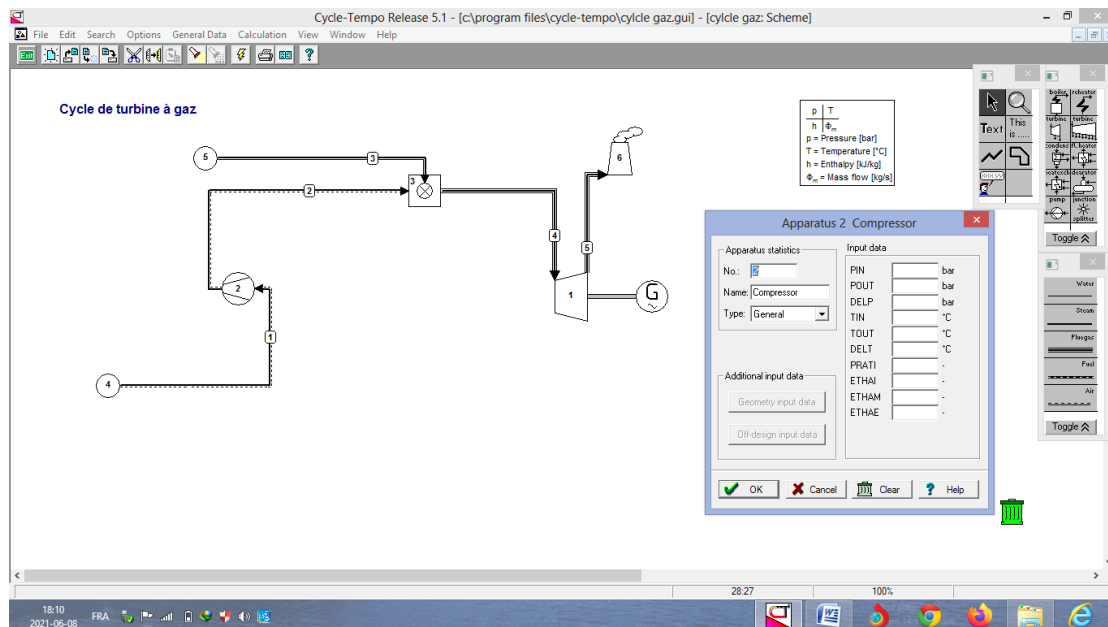


Figure (IV-8) : Paramètres de compresseur

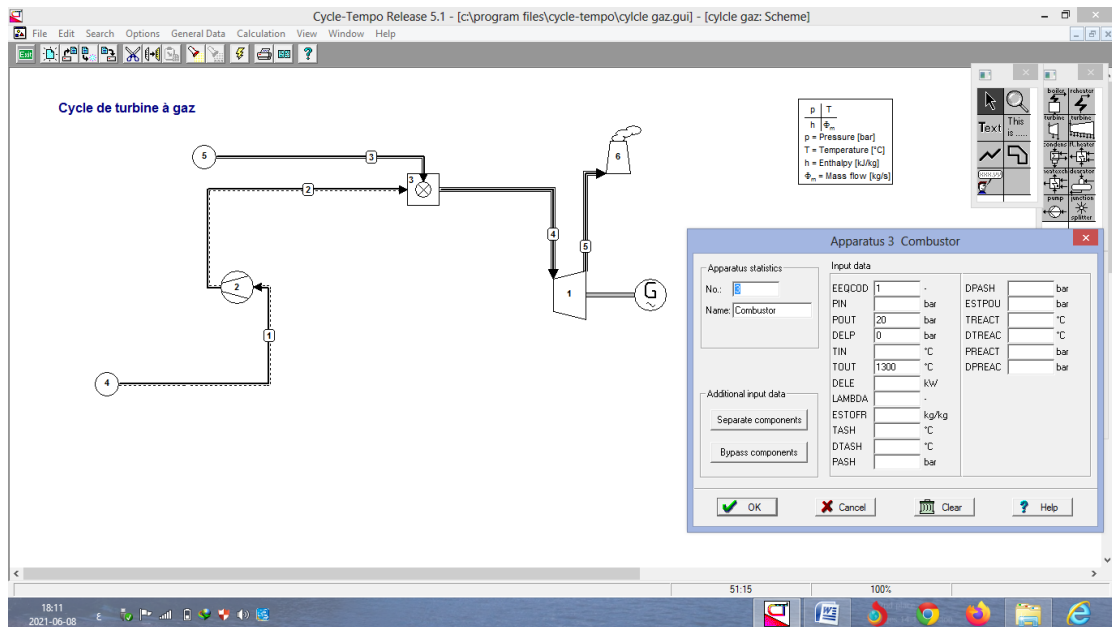


Figure (IV-9) : Paramètres de la chambre combustion

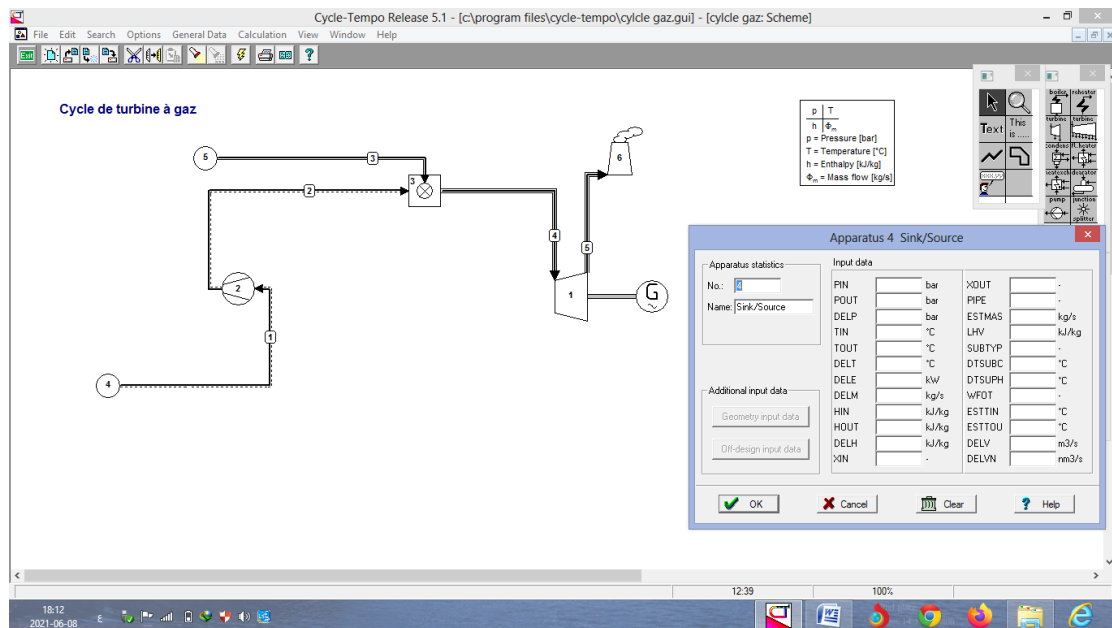


Figure (IV-10) : Paramètres de la source 4

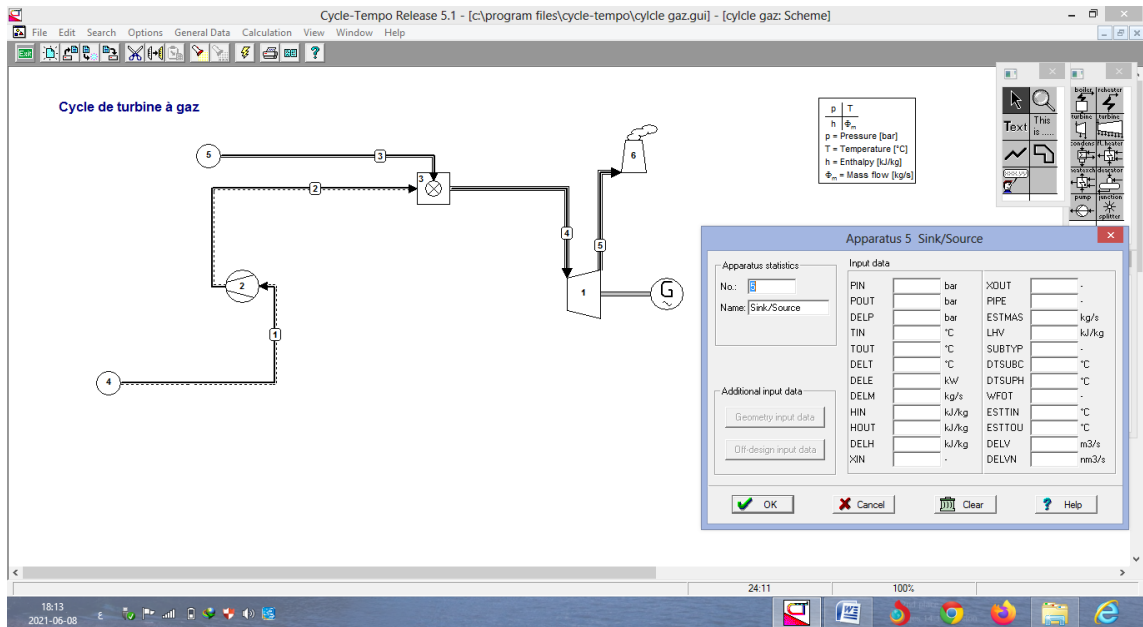


Figure (IV-11) : Paramètres de la source 5

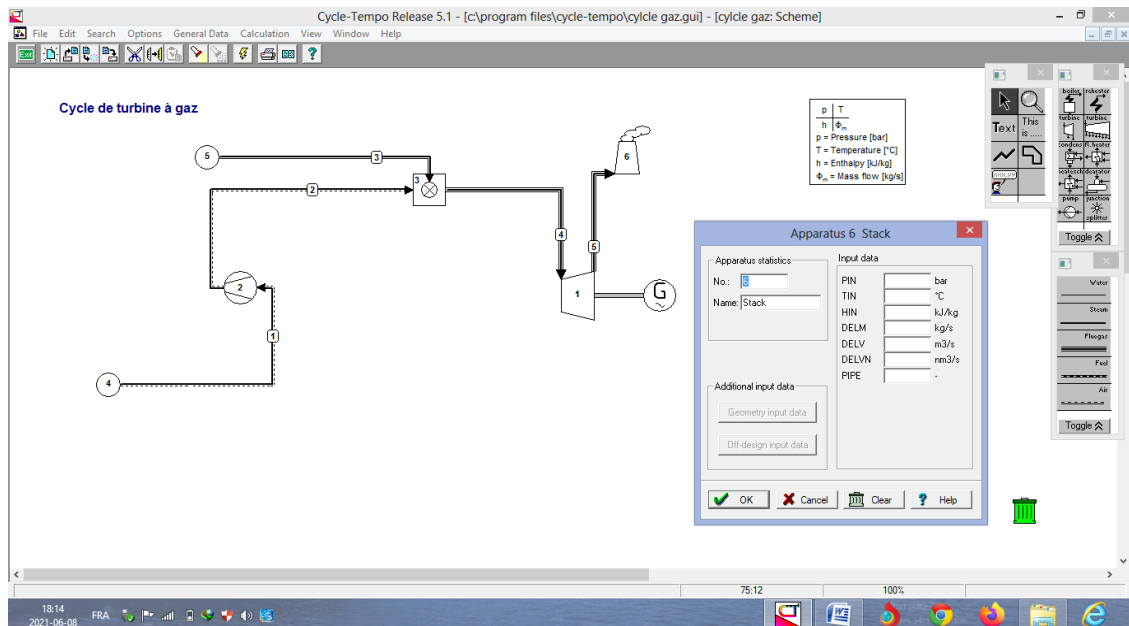


Figure (IV-12) : Paramètres d'échappement

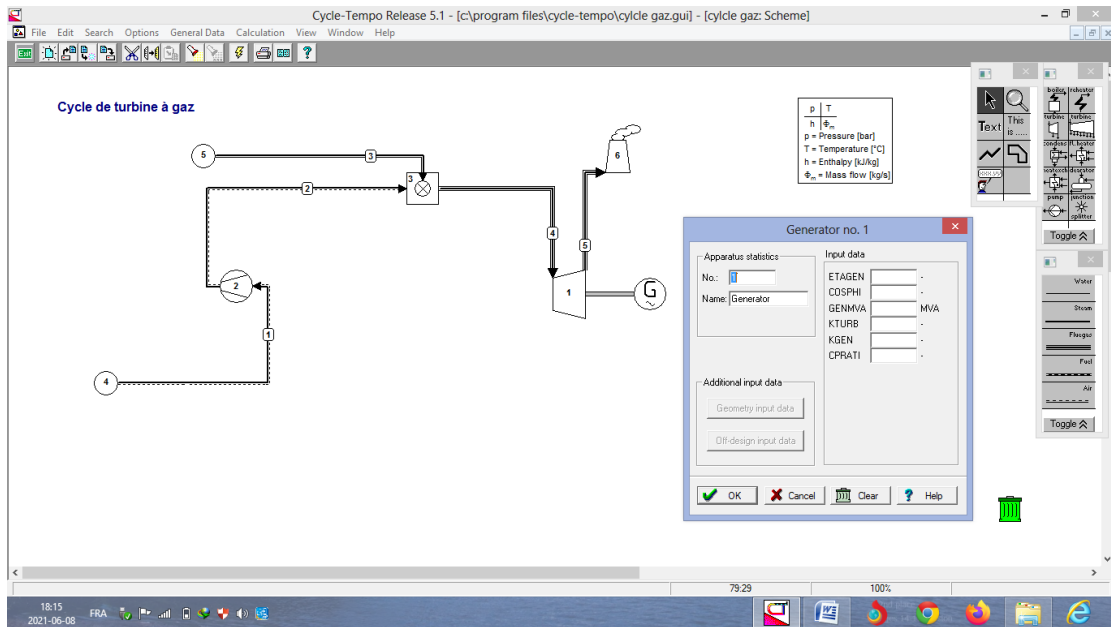


Figure (IV-13) : Paramètres de générateur

IV.4.2. Conception d'une installation d'une turbine à vapeur

La turbine à vapeur figur (IV-14) est constituée d'une turbine (1), un condenseur (2), une pompe (3) et générateur de vapeur (4)

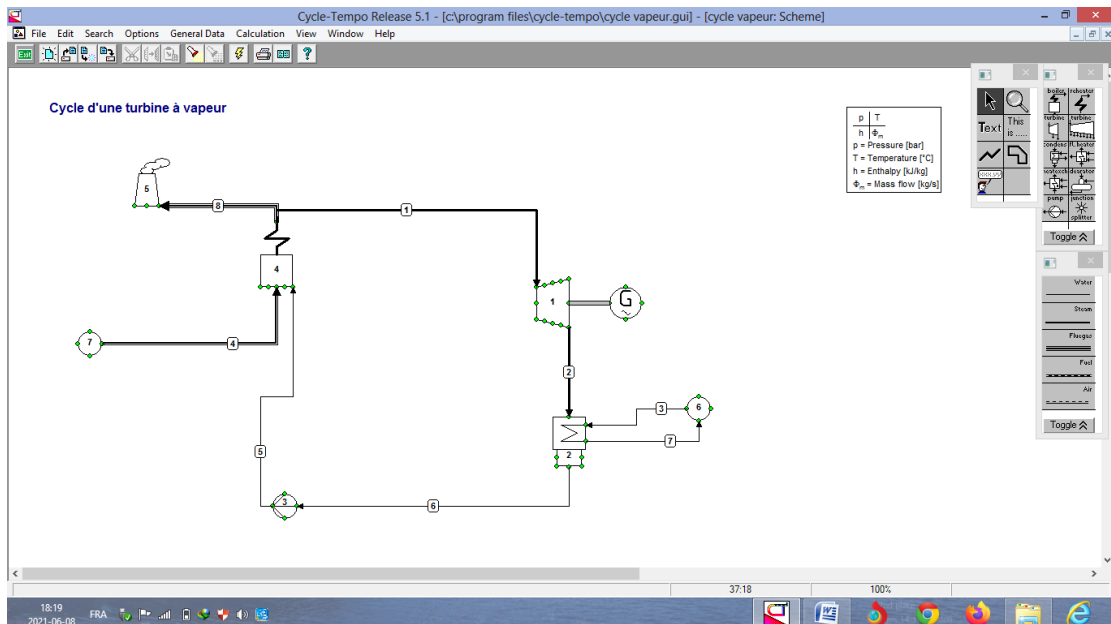


Figure (IV-14) : Conception de la turbine à vapeur

La figure (IV-15) Montre la description des appareils utilisés dans la réalisation de l'installation de la turbine à vapeur.

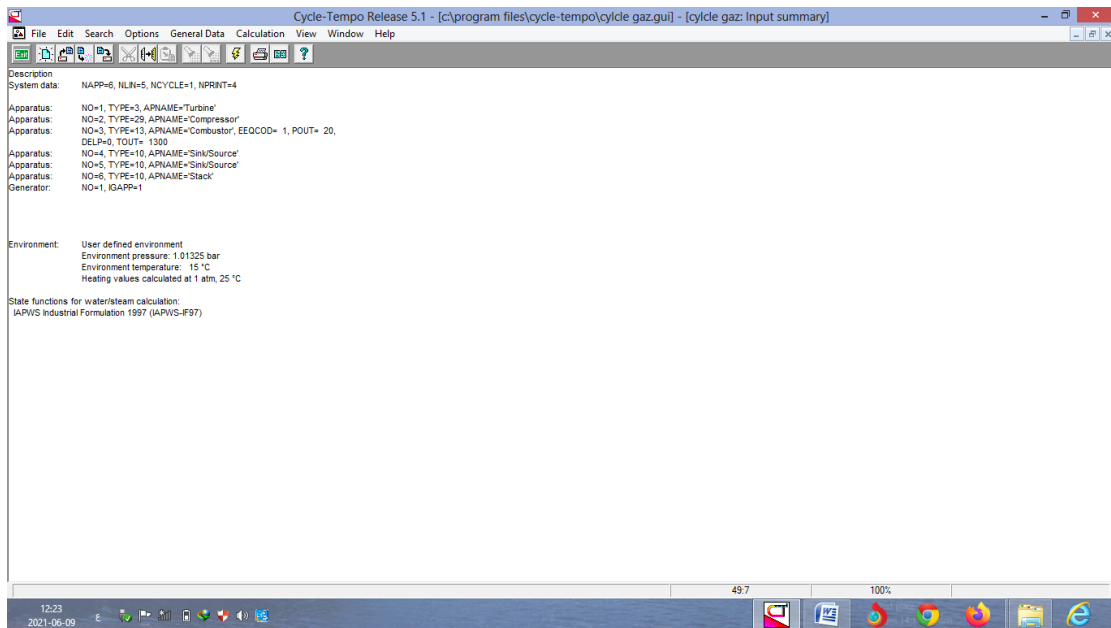


Figure (IV-15) : Description des appareils utilisés la turbine à vapeur.

Les figures (IV.16 , 17 , 18 , 19 , 20 , 21 , 22 et 23) montrent les parametres des appareils utilisés dans la réalisation de l'installation de la turbine à vapeur.

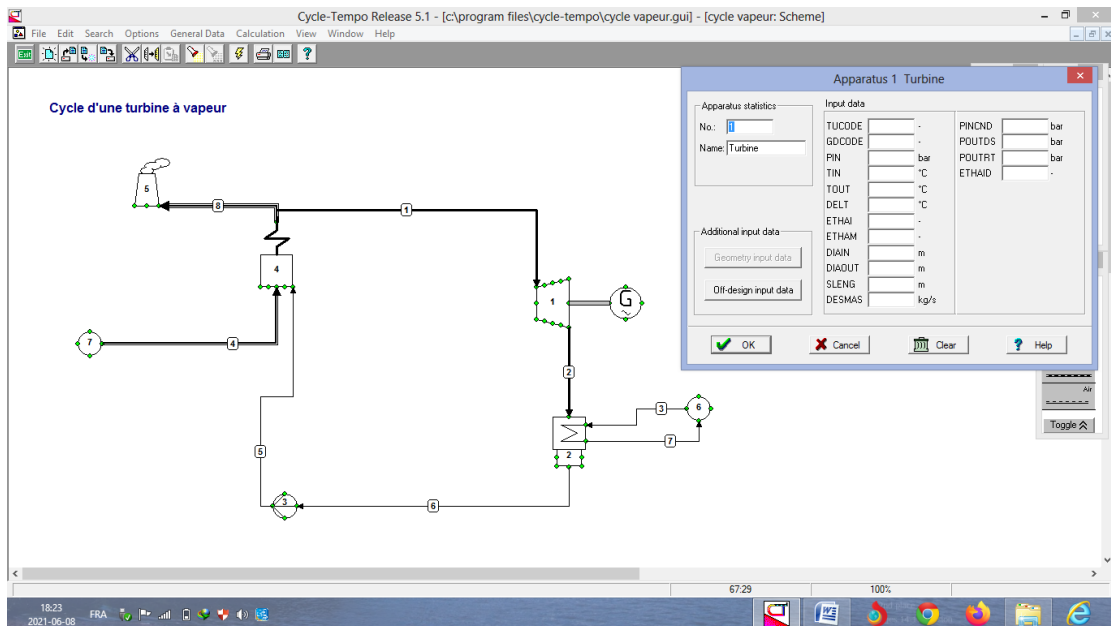


Figure (IV-16) : Paramètres de la turbine

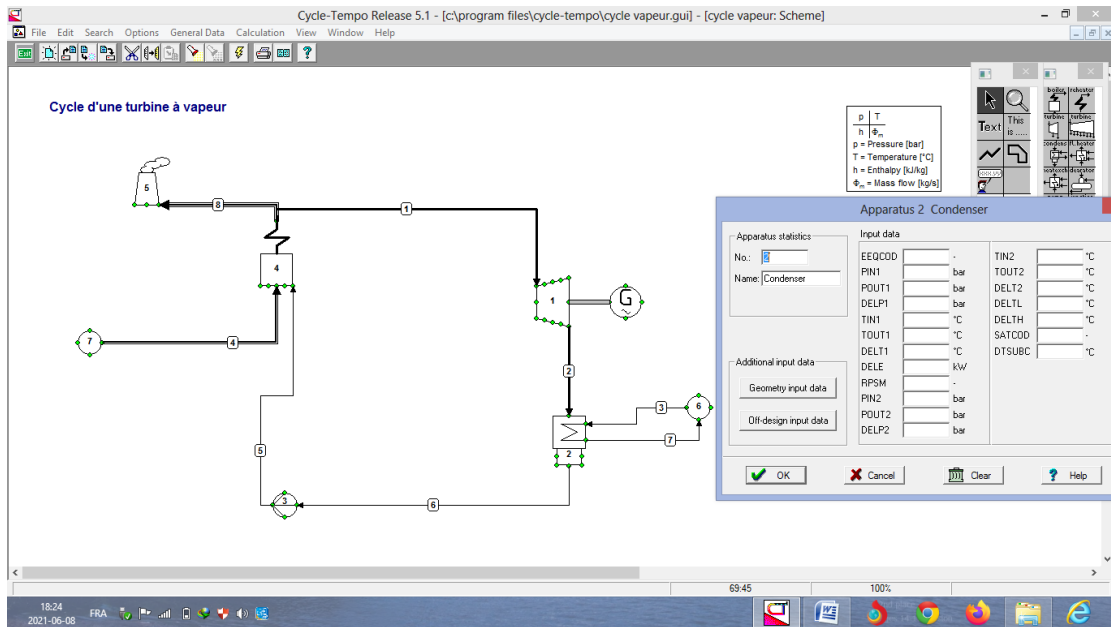


Figure (IV-17) : Paramètres du condenseur

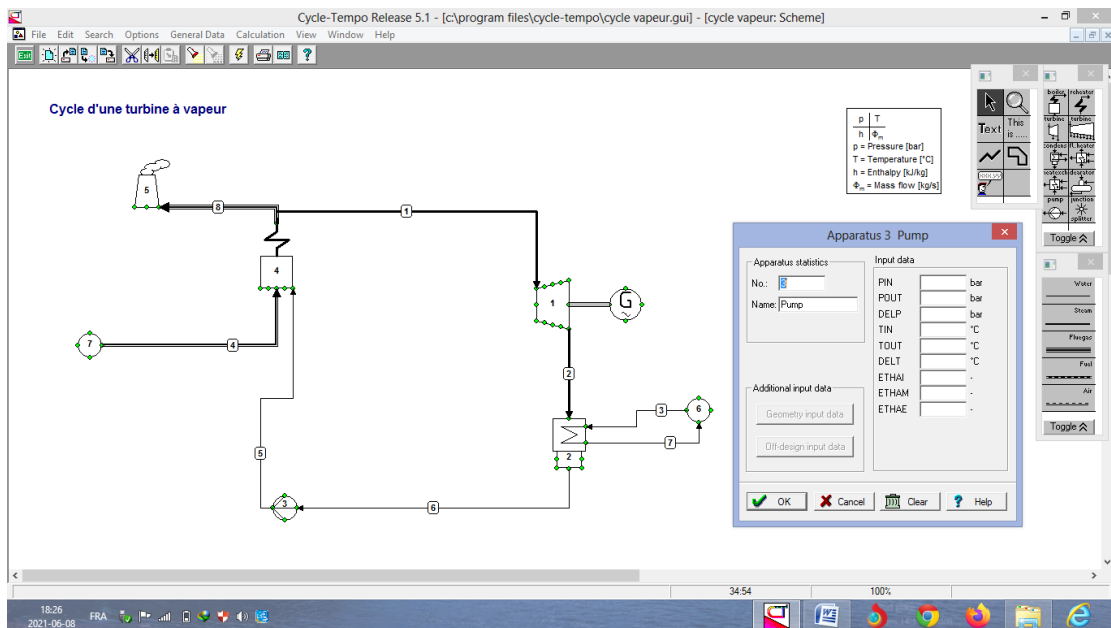


Figure (IV-18) : Paramètres de la pompe

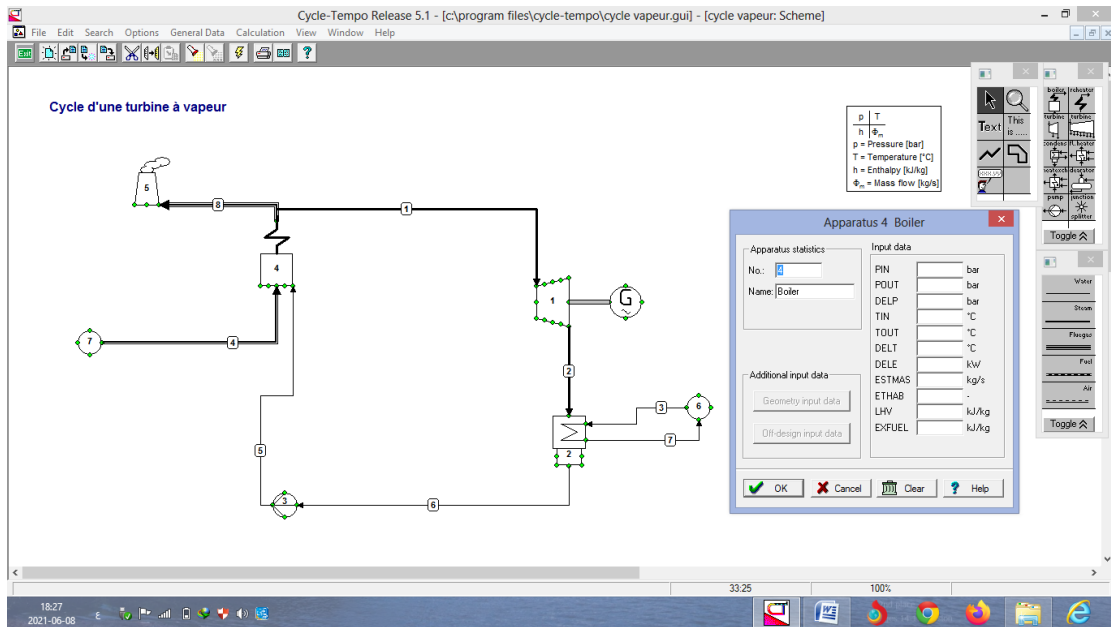


Figure (IV-19) : Paramètres de la chaudière

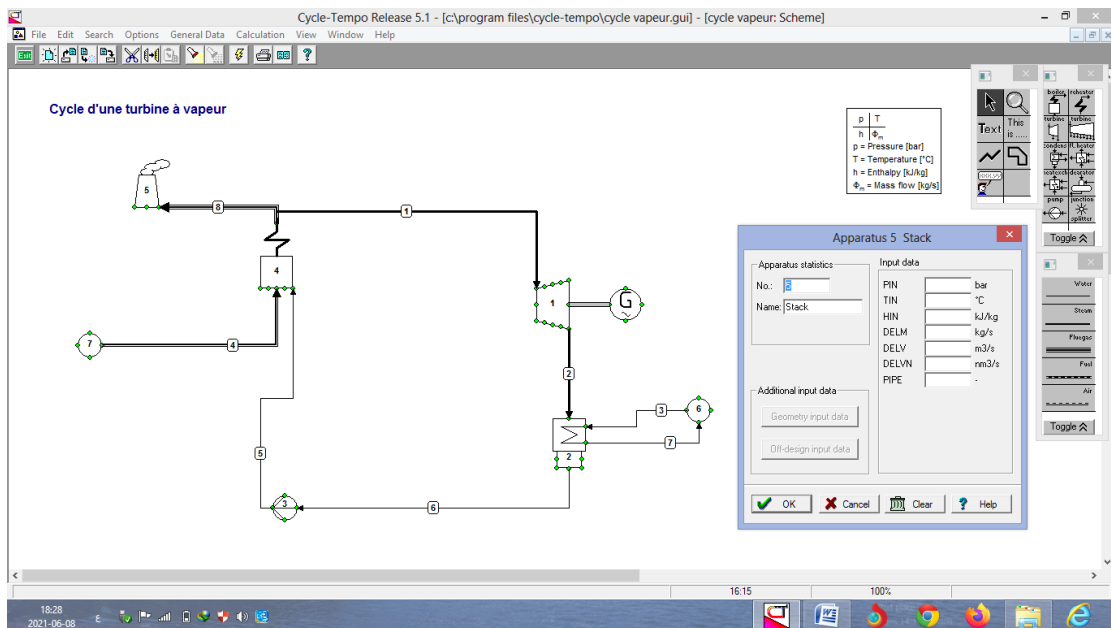


Figure (IV-20) : Paramètres d'échappement

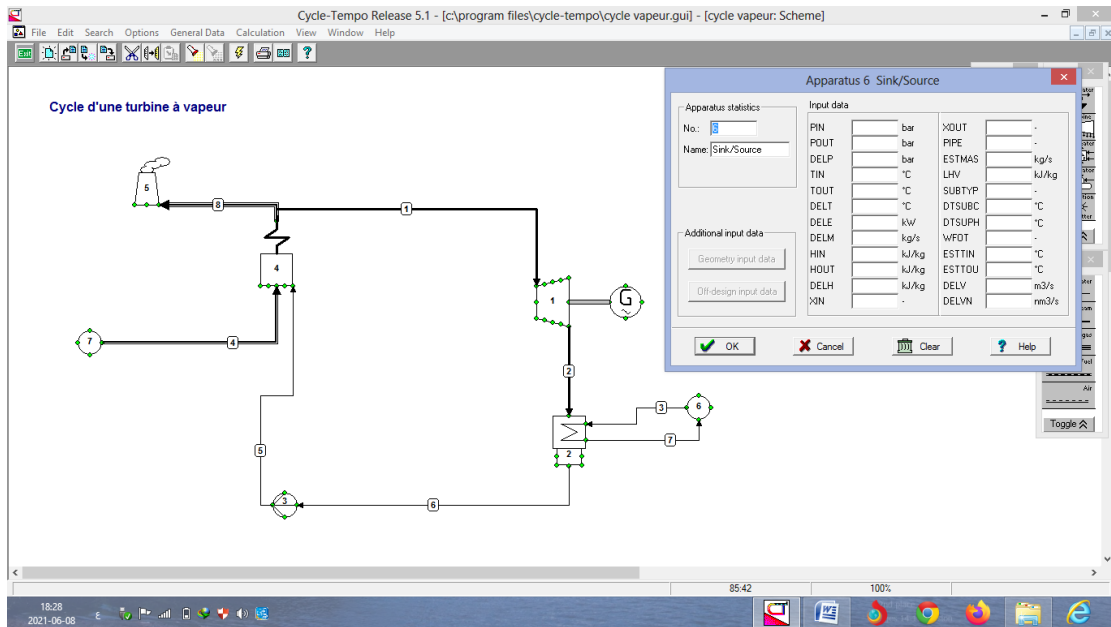


Figure (IV-21) : Paramètres de la source 6

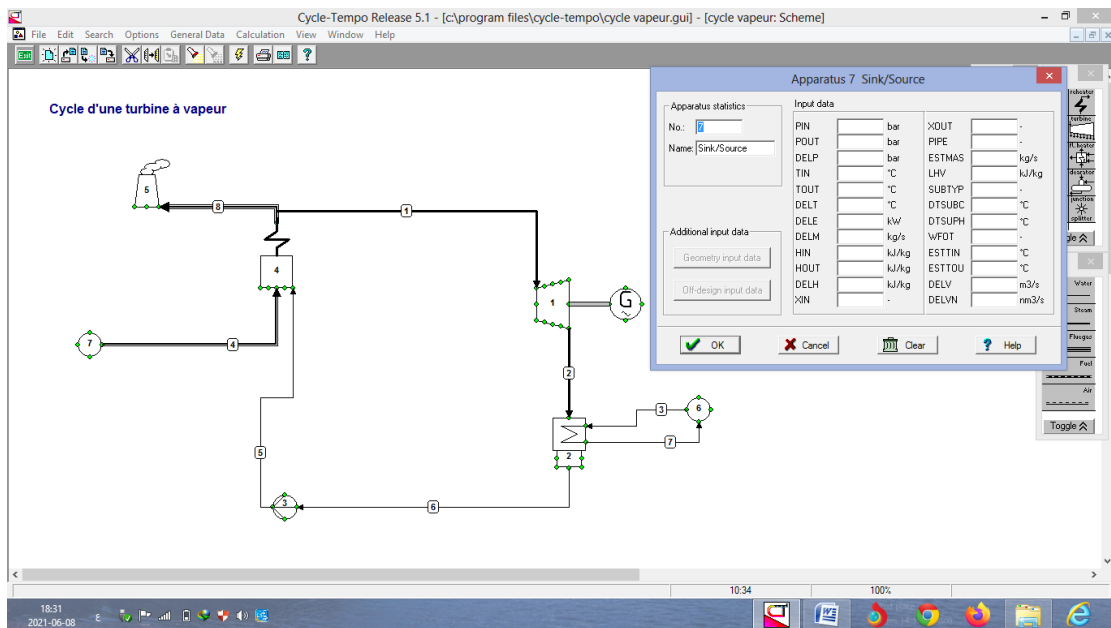


Figure (IV-22) : Paramètres de la source 7

La figure (IV.25) montre la description des appareils utilisés dans la réalisation de l'installation du centrale thermique à cycle combiné.

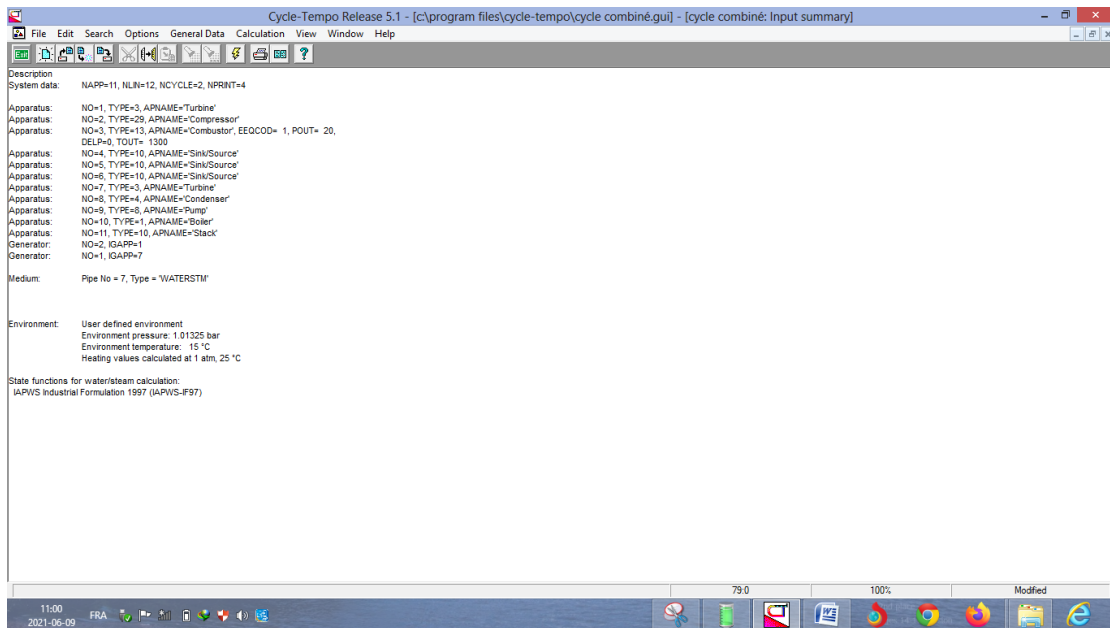


Figure (IV-25) : Description des appareils utilisés dans centrale thermique à cycle combiné.

IV.5. Programmation

Pour déterminer le rendement du centrale thermique à cycle combiné on propose un programme informatique réalisé par le langage WINDEV25. Ce programme détermine le rendement du cycle combiné en fonction du rendement de la turbine à gaz et celui de la turbine à vapeur.

Cela par le calcul premièrement du rendement de la turbine à gaz puis il calcule celui de la turbine à vapeur. En fin le programme détermine le rendement du cycle combiné.

La figure (IV-26) : montre l'interface du programme ou sont présenté les icones d'entrée et des résultats de calcul.

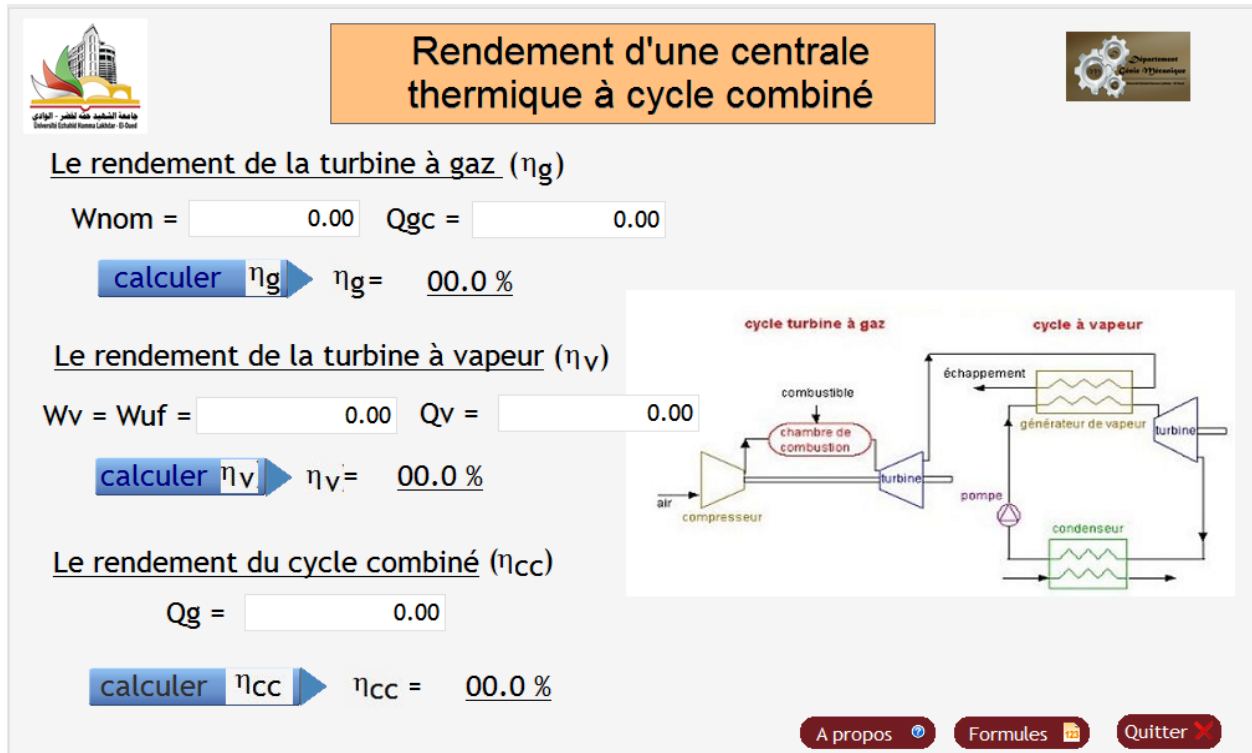


Figure (IV-26): Interface du programme présentant les icones d'entrée et des résultats.

La Figure (IV-27) : Montre l'interface du programme ou sont présentés les formules utilisés dans le calcul.

Retour ↩

Rendement du cycle combiné	$\eta_{cc} = \frac{w_g + w_v}{Q_g} = \eta_g + \frac{Q_v}{Q_g} \eta_v$
Rendement de la turbine à gaz	$\eta_g = \frac{3600 \times W_{nom}}{q_{gc} \times PCI}$
Rendement de la turbine à vapeur	$\eta_v = \frac{W_{uf}}{Q_v}$

ηg : Rendement de la turbine à gaz	Wg : travail utile (cycle à gaz)
ηv : Rendement de la turbine à	Qg : chaleur fournie (cycle à gaz)
ηcc : Rendement du cycle combiné	Wv (Wuf) : travail utile (cycle à vapeur)
Wnom : puissance nominale de la turbine	Qv : chaleur absorbée (cycle à vapeur)
Qgc nom : consommation nominale en gaz	
PCI : pouvoir calorifique inférieur du gaz "aux conditions standards PCI = 8000 Kcal/m3)"	

Figure (IV-27) : Interface du programme présentant les formules utilisées dans le calcul.

IV.6. Conclusion

Dans cette partie du chapitre, nous parlons brièvement de la description de la station SB1 BIS Djamâa, dans laquelle nous avons mené notre étude pendant la période de formation, et cette station sera présentée plus en détail.

D'après cette étude on a remarqué que pendant la conception des installations des trois cycles que l'installation du cycle combiné est plus compliqué que les deux autres installations de gaz et de vapeur.

Dans le cycle combiné on économise de l'énergie par l'alimentation de la chaudière dans le cycle de vapeur par les gaz d'échappement plus chauds au lieu d'une alimentation à partir d'une source. Ces gaz d'échappement assurent le chauffage de l'eau dans la chaudière pour produire la vapeur qui alimente la turbine à vapeur.

Conclusion générale

Conclusion générale

Compte tenu du développement industriel de notre pays, il est remarqué ces dernières années une augmentation significative des besoins énergétiques, à une diminution des ressources fossiles et à des préoccupations environnementales de plus en plus importantes. L'objectif est de trouver les meilleures options pour obtenir une production d'énergie pour atteindre ces objectifs grâce à la combinaison de turbines à gaz et à vapeur. Pour mieux répondre à ces objectifs, nous avons divisé ce travail en quatre sections.

- ✓ Dans les première et deuxième parties, nous avons présenté une étude sur les turbines à gaz et à vapeur, qui nous a permis de dire que cette dernière est la plus appropriée dans la production d'énergie électrique pour notre pays, au regard des avantages offerts par le carburant et l'énergie, car nous avons combiné les deux cycles ensemble.
- ✓ Et dans la troisième partie consacrée au fonctionnement du cycle combiné (cc), on peut dire que la technologie du cycle combiné est une technologie moderne et sa maîtrise permet d'augmenter son efficacité et sa production à des niveaux élevés de fréquence et de fiabilité et de réduire ces pertes.
- ✓ Quant à la quatrième partie, elle est consacrée à la description de la station de pompage SP1 BIS (Al- Marara), où nous avons fait une visite à cette station en plus on a consulté ses employés qualifiés, ce qui nous a permis d'acquérir des connaissances pratiques (prévention et contrôle du travail). Dans cette partie, nous avons également créé une installation d'un cycle combiné par l'utilisation du logiciel de simulation cycle-tempo ainsi par l'élaboration d'un programme (le langage WINDEV25) pour calculer le rendement des trois cycles (gaz – vapeur et combine).

bibliographie

bibliographie

- 1-**METALLAOUI NASSIM** Étude thermodynamique de la turbine à gaz MS7001EA au niveau du complexe GNL1K de Skikda UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA2016/2017.
- 2-**David J. Taylor Olivier Crabos**, “GE Power Systems Gas Turbine and Combined Cycle Products Technology - Experience - Innovation”, Gas turbine and Combined Cycle - GE Power Systems 2003.
- 3- **Baskharone E.A.**, 1984, Optimisation of the Three Dimensional Flow Path in the Scroll-Nozzle System of a Radial Inflow Turbine, Journal of Engineering for Gas Turbines, and Power VOL. 106.
- 4-**Doc SK SKIKDA**, les notions de base d'une centrale à cycle combiné.
- 5- **BOUAM Abdallah** Amélioration des performances des turbines à gaz utilisées dans l'industrie des hydrocarbures par l'injection de vapeur d'eau à l'amont de la chambre de combustion univ-boumerdes 2009.
- 6- **Ohno, Y., Zhao, D. Furuhata, T., Yamashita, H., Arai, N., & Hisazumi, Y.**, “Combustion characteristics and NOx formation of a gas turbine system with steam injection and two-stage combustion”, Proceedings of International Joint Power Generation Conference & Exposition, Miami Beach, Florida, July 23-26, ASME paper IJPGC2000-15046.
- 7- **BOUCHEBOUT Said -DEFFAS Chemseddine** analyse 4e (energie-exergie-economique-environnementale) d'une centrale à turbine à gaz universite de jijel 2018/2019.
- 8-**ENSPM Formation Industrie - IFP Training**. Machines Tournantes : turbines à gaz technologie et fonctionnement. 2005.
- 9- **Marie-Noëlle Dumont**, Simulation et Aide au Dimensionnement des Chaudières de Récupération.
- 10- Gunt, Connaissances de base Turbines [en ligne] (page consultée le05/07/2019). https://www.gunt.de/images/download/turbines_french.pdf.
- 11- **GE oil & gas - Nuovo Pignone**. Manuel de formation pour la conduite et l'entretien d'une turbine à gaz MS 5002 C.

12-Institut Supérieur des Sciences et d Technologie de l'environnement Borj Cédria « I.S.S.T.E », GE. Créer un modèle de calcul de la performance d'une turbine à gaz. Projet de fin d'études «PFE».

13-KLAI SIHEM ,construction d'une ontologie à partir de bases de données pour l'aide à la maintenance industrielle application : turbine à vapeur univ-skikda 2008/2009.

14-SAMI BOUTERRA ,Etude comparative par simulation de deux aubes de turbine à vapeur . UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA 2016/2017.

15-Brahim BOUAZZA ,principes de logiciel de nouvelle génération d'assistance à la mise au point de procédés industriels université du québec 2015.

16-Charles KEMPER, ABB ALSTOM POWER, les centrales électriques à cycle combiné. Décembre 1999.

17-KADDACHE Karima - NALUWEMBE Sana - Siraj Musanje ,Étude comparative des performances des trois centrales thermiques de production de l'énergie électrique ; dont cycle à vapeur , cycle à gaz et cycle combiné. **2016/2017**.

18- MOUHOUN NOUREDDINE -ZEBDA NOURELISLAM Contribution à l'étude énergétique d'une Centrale électrique à Cycle combiné université Mohammed boudiaf - m'sila 2017.

19- Peter LEHMACHER, Prinzip eines KOMBIKRAFTWERKS, Ingenieurbüro für Technik und Information, Bonn, 2005.

20- lila MEZIANE, Analyse des performances d'unités de production d'énergie : cas de turbines à gaz. .univ-boumerdes 2010.

Résumé:

Ce travail consiste d'abord à réaliser une analyse thermodynamique des turbines à gaz et à vapeur, puis du cycle combiné. La demande d'énergie continue de croître, et les ressources deviennent de plus en plus chères, il est donc nécessaire d'améliorer les performances des installations thermiques des turbines à gaz et à vapeur afin d'améliorer les performances du cycle combiné. L'ajout d'eau, qu'elle soit liquide ou vapeur, a permis d'améliorer les performances des installations à gaz et à vapeur, et le but de ce travail est de permettre l'étude des performances et des paramètres qui affectent le rendement d'une centrale thermique à cycle combiné en utilisant le programme de simulation Cycle Tempo.

Pour cela, nous avons traité et amélioré les cycles gaz et vapeur en montrant comment les utiliser simultanément pour créer un cycle combiné.

Mots clés : turbines à gaz, turbines à vapeur, centrale thermique, cycle combiné.

Abstract:

This work consists first of conducting a thermodynamic analysis of gas and steam turbines and then of the combined cycle. Energy demand continues to grow, and resources become expensive, so it is necessary to improve the performance of gas and steam turbine thermal installations in order to improve combined cycle performance. The addition of water, whether liquid or steam, has improved the performance of gas and steam installations, and the aim of this work is to enable the study of performance and parameters that affect the efficiency of a thermal central combined cycle power plant using Cycle Tempo simulation program.

For this, we dealt with and improved on gas and steam cycles, showing how to use them simultaneously to create a combined cycle.

Keywords: Gas turbines, steam turbines, thermal central, combined cycle.

ملخص

يتكون هذا العمل أولاً من إجراء تحليل ديناميكي حراري لتوربينات الغاز و البخار ، ثم الدورة المركبة. يستمر الطلب على الطاقة في النمو ، بينما تصبح الموارد باهظة الثمن ، لذلك من الضروري تحسين أداء التركيبات الحرارية للتوربينات الغازية و البخارية وبالتالي أدى إلى تحسين أداء الدورة المركبة أدى إضافة الماء سواء كان سائل أو بخار الى تحسين أداء منشآت الغاز و البخار و الهدف من هذا العمل هو أن تكون قادرًا على نمذجة ودراسة الأداء والمعلمات التي تؤثر على كفاءة محطة توليد الطاقة ذات الدورة المركبة باستخدام برنامج محاكاة Cycle Tempo. لهذا ، تعاملنا مع دورات الغاز ودورات البخار وتحسينها ، وكذلك كيفية استخدامها في وقت واحد لإنشاء دورة مركبة.

الكلمات المفتاحية : التوربينات الغازية ، التوربينات البخارية ، الدورة المركبة ، الطاقة الحرارية.