

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GÉNIE MECANIQUE

**Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master
en énergétique**

Thème :

**Etude énergétique de la TAG de la centrale Boufarik 2 et sa
maintenance ($P=3*235$ MW, $N=3000$ tr/min)**

Promoteur : Dr. Saïd Mohamed.

Co-promoteur: Zerfa Abderrezak

Présenté par :

M^r.OUIDAH Mohamed Achraf

M^r.RERRIB ALLAH Abdelraouf

M^r. MOHAMED BELKEBIR Abdelrezak

Promotion : 2024/2025

Remerciements

Remerciements Avant toute chose, nous adressons nos plus sincères remerciements à Dieu Tout-Puissant, qui a éclairé notre chemin et nous a guidés dans l'accomplissement de ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur **Saïd Mohamed**, pour nous avoir offert l'opportunité de travailler sous sa direction. Sa confiance, sa disponibilité et sa bienveillance ont grandement contribué à la réalisation de ce projet.

Nous saisissons également l'occasion de cette soutenance pour remercier chaleureusement la présidence ainsi que les membres du jury pour leur présence et leur intérêt porté à notre travail.

Nos remerciements les plus sincères vont à notre encadrant, Monsieur **Zerfa Abderrezak**, pour son accompagnement constant tout au long de notre stage. Sa patience, ses conseils avisés et ses remarques pertinentes ont été d'un grand soutien.

Enfin, nous tenons à remercier l'ensemble de l'équipe de l'unité de Boufarik 2 (Sonelgaz) pour leur accueil et leur précieuse collaboration.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

À notre « Seigneur, Dieu tout puissant », merci de m'avoir donné la vie, la foi, et d'avoir exaucé mes prières pour que j'y parvienne.

À celui qui m'a un jour dit que j'étais la prune de ses yeux, et qui voyait dans chacun de mes petits succès une grande victoire, à l'homme qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui, car il est **mon Père**, dans ses yeux, je vois la fierté, le modèle de respect et d'amour paternel, de compréhension et de générosité, grâce à toi, j'ai appris à être le fils qui fait tout pour te rendre heureux et fier.

À celle dont les paroles m'accompagnent depuis mon enfance, la première femme forte, courageuse, qui a souffert sans jamais nous laisser souffrir, Celle qui m'a appris à être un garçon fort, à toujours poursuivre mes objectifs coûte que coûte ; celle qui m'a encouragé à croire en mes rêves même lorsque tout semblait impossible, mon ange gardien, ton amour et ta présence dans ma vie, et le fait d'être **ma Mère** continueront d'éclairer mon chemin.

À ma seule et unique grande sœur **Manel**, merci d'avoir toujours été là, comme une seconde maman, une amie, un repère, ta force, ta sagesse et ton amour inconditionnel m'ont guidé dans les moments les plus durs.

À mes frères **Islam** et **Akram**, Mes complices, mes piliers Vous êtes ma fierté, mon énergie, mon équilibre. Grâce à vous, je sais que je ne suis jamais seul vous êtes toujours cru en moi, même quand moi je doutais. Votre présence est un cadeau précieux que la vie m'a offert, et je vous serai éternellement reconnaissant.

À tous ceux qui me sont chers, ceux à qui je dois mon succès, ceux qui ont eu un impact sur ma vie, et à tous ceux que mon cœur a aimés.

OUIDAH ACHRAF

Dédicace

Je dédie ce travail :

À **ma maman**, pour son amour inconditionnel, son soutien constant et ses encouragements tout au long de mes années d'études. Qu'elle trouve dans ces lignes l'expression sincère de ma profonde reconnaissance.

À mon frère **Adda**, à ma sœur **Soraya**, à mes grands-parents, et à tous ceux qui ont partagé avec moi les instants d'émotion et les efforts liés à la réalisation de ce mémoire. Leur présence chaleureuse et leurs encouragements ont été pour moi une source inestimable de motivation.

À **ma famille**, mes proches, et à tous ceux qui, par leur affection et leur bienveillance, m'ont apporté force et vivacité dans les moments les plus décisifs.

Enfin, à mes amis fidèles, pour leur soutien indéfectible. Je leur souhaite une réussite encore plus grande dans tous leurs projets à venir.

RERRIB ALLAH Abdel Raouf

Dédicace

Je dédie ce travail :

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce parcours.

À mes **chers parents**, pour leur amour inconditionnel, leur soutien moral et leurs sacrifices constants. Vous êtes ma source de motivation et ma plus grande fierté.

Pour leur présence, leurs encouragements et leurs prières tout au long de ce chemin.

À **Monsieur le Chef de Département**, pour, sa rigueur et son engagement envers la qualité de notre formation.

À mon **promoteur**, pour ses conseils précieux, sa disponibilité et sa bienveillance qui m'ont guidé tout au long de ce travail.

À tous mes **camarades de promotion**, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables d'apprentissage, de persévérance et d'amitié.

Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont marqué cette étape importante de ma vie. Merci infiniment.

MOHAMED BELKEBIR Abderrazak

Résumé :

Les turbines à gaz jouent un rôle majeur dans la production de l'énergie électrique, grâce à leur fiabilité au cours du fonctionnement et leurs avantages d'alimenter le réseau électrique dans un temps réduit. Cependant, sans un contrôle adapté des conditions ambiantes, notamment la température et la densité de l'air, leurs performances peuvent être fortement impactées. En effet, une turbine à gaz se distingue par un rendement relativement faible et une grande sensibilité aux variations climatiques, particulièrement entre les périodes estivales et hivernales, ce qui influence directement sa puissance et sa consommation spécifique.

L'objectif de ce travail déterminer l'ensemble des paramètres et des performances pour une turbine à gaz centrale de bouferik2 avec différentes températures ambiantes et de déterminer l'impact de ces variations de température sur le rendement et la puissance et la consommation spécifique ainsi une comparaison entre les résultats

Aspect:

Gas turbines play a major role in the production of electrical energy due to their operational reliability and their ability to quickly supply power to the electrical grid.

However, without proper control of ambient conditions—particularly air temperature and density—their performance can be significantly affected. Indeed, a gas turbine is characterized by relatively low efficiency and high sensitivity to climatic variations, especially between summer and winter periods, which directly impacts its power output, efficiency, and specific fuel consumption.

The objective of this study is to determine the set of parameters and performance indicators of a gas turbine at the Boufarik 2 power plant under different ambient temperature conditions, and to analyze the impact of these variations on efficiency, power output, and specific consumption. A comparison of the obtained results will provide a better understanding of how climatic conditions influence the operation of the turbine.

ملخص:

تلعب التوربينات الغازية دورًا رئيسيًا في إنتاج الطاقة الكهربائية، وذلك بفضل موثوقيتها أثناء التشغيل وقدرتها على تزويد الشبكة الكهربائية بالطاقة في وقت قصير. ومع ذلك، فإن أدائها يمكن أن يتأثر بشكل كبير في حال عدم التحكم الجيد في الظروف المحيطة، لا سيما درجة حرارة الهواء وكثافته. إذ تتميز التوربينات الغازية بكفاءة منخفضة نسبيًا وحساسية كبيرة للتغيرات المناخية، خاصة بين فصلي الصيف والشتاء، مما يؤثر بشكل مباشر على قدرتها وكفاءتها واستهلاكها النوعي للوقود. يهدف هذا العمل إلى تحديد مجموعة من المعايير والأداءات لتوربينة غازية في محطة بوفاريك 2 تحت ظروف درجات حرارة محيطية مختلفة، وتحليل تأثير هذه التغيرات على الكفاءة والقدرة والاستهلاك النوعي. كما سيتم إجراء مقارنة بين النتائج المتحصل عليها لفهم أفضل لتأثير الظروف المناخية على تشغيل التوربينة.

Table des matières

Introduction générale

CHAPITRE I : Généralité sur la turbine à gaz

I. 1. Introduction	01
I. 2. Historique de la turbine à gaz	01
I .3. Définition de la turbine à gaz	01
I .4. Les éléments principaux de la turbine à gaz	01
I. 5. Les différentes centrales électriques	02
I .5.1 . centrale électrique à cycle simple	02
I .5.2 . centrale électrique à cycle combinée	02
I .5.3 . centrale de cogénération	03
I .6. Classification des turbines à gaz	04
I .6.1 . D'après le mode de construction	04
I .6.2. Selon mode de travail	05
I .6.3. Selon le mode de fonctionnement thermodynamique	05
I .7. Principe de fonctionnement	06
I .8. Domaines d'application	06
I .9. Avantages et Inconvénients	06
Conclusion :	08

CHAPITRE II : Présentation de la centrale Boufarik 2

II. 1. Introduction	09
II. 2. Présentation de la centrale Boufarik 2	09
II.3. Fiche Technique de la Centrale	11
II. 4. Turbo-alternateurs et systèmes BOP	11
II.4.1. Turbo-alternateurs.....	11
II.4.2. Installations BOP.....	12
II.5. Systèmes commissionnés	14
II . 5.1. Partie Mécanique.....	14
II.5.2. Partie Électrique	15
II .5.3. Partie Instrumentation	16
Conclusion :	17

CHAPITRE III : Simulation de la turbine à gaz 9FA

III.1. Introduction	18
III.2. présentation du site Ain aicha Boufarik 2	18
III.3. Etude du cycle thermodynamique d'une turbine à gaz	19
III.3.1. Cycle de brayton	19
III.4. Performances de la turbine à gaz	21
III.4.1. Performance du cycle idéal	22
III.4.2. Performance du cycle réel.....	24
III.5. Calcul thermodynamique	26
III.5.1. Calculs des paramètres et performance de la journée (20.10.2024)	26
III.5.2. Calculs des paramètres et performance de la journée (21.06.2024)	31
III.5.3. Comparaison des résultats	34
III.6. Présentation du logiciel EES	35
III.7. Les courbes de performance en fonction de la température ambiante	35
III.8. Influence des facteurs sur les performances de la turbine à gaz	39
III.8.1. Influence des facteurs extérieurs sur les performances La turbine à gaz	39
III.8.1.1. Température ambiante	39
III.8.1.2. Pression atmosphérique	39
III.8.1.3. Humidité relative	39
III.8.1.4. Les poussières	39
III.8.2. Influence des facteurs intérieurs sur les performances de la TAG	40
III.8.2.1. Pertes de charge dans la section d'admission du compresseur	40
III.8.2.2. Pertes de charge dans le système d'échappement	40
III.8.2.3. Influence du type de combustible	40
Conclusion :	41

CHAPITRE IV : Maintenance de la turbine à gaz

IV.1. Introduction	42
IV.2. Définition de la maintenance	42
IV.3. Rôle de la maintenance	42
IV.4. Objectifs de la Maintenance	42
IV.5. Les Types de Maintenance	43
IV.5.1. Maintenance Corrective.....	43
IV.5.2. La Maintenance Préventive	44
IV.6. Les formes de la maintenance	46
IV.7. Les Fonctions d'un Service Maintenance	46
IV.7.1. Fonction Méthode	46
IV.7.2. Fonction Ordonnancement	47
IV.7.3. Fonction Exécution et Réalisation.....	47
IV.7.4. Fonction Documentation	47
IV.7.5. Fonction de Lancement	48
IV.7.6. Fonction de Gestion des Stocks.....	48
IV.7.7. Fonction de Gestion des Coûts	48
IV.8. Maintenance appliquée sur la turbine à gaz 9FA	48
IV.8.1. Vanne IBH (inlet blade heat)	50
IV.8.1.1. Inspection urgente et sécurisation immédiate	50
IV.8.1.2. Diagnostic technique	50
IV.8.1.3. Intervention corrective	51
IV.8.1.4. Vérification des attaches et soudures	51
IV.8.1.5. Risques spécifiques pour la turbine à gaz	51
IV.8.2. Vanne de l'eau entier incendie	51
IV.8.2.1. Constat visuel	52

IV.8.2.2. Corrosion potentielle	52
IV.8.2.3. Recommandations de maintenance (préventive et corrective)	52
IV.8.2.4. Risque spécifique dans une turbine à gaz	53
IV.8.3. Pompe de l'eau	54
IV.8.3.1. Nettoyage et inspection visuelle	54
IV.8.3.2. Maintenance mécanique	54
IV.8.3.3. Prévention de la corrosion	55
IV.8.3.4. Repose et serrage	55
IV.8.3.5. Essai de fonctionnement	55
IV.8.3.6. Importance dans le système de la turbine à gaz	55
IV.8.4. Lavage de compresseur	55
IV.8.4.1. L'importance de lavage du compresseur	56
IV.8.4.2. Les méthodes de lavage	56
IV.8.5. Coswin	56
IV.8.5.1. Objectif principal de Coswin chez Sonelgaz	57
IV.8.5.2. Fonctionnalités principales de Coswin	57
IV.8.5.3. Cas d'utilisation chez Sonelgaz	58
IV.8.5.4. Avantages pour Sonelgaz	58
Conclusion :	59

Conclusion Générale

Références bibliographiques

Liste des symboles :

Variable	Designations	Unité
P	Pression	bar
T	Température	°C
Patm	Pression atmosphérique	bar
Tamb	Température ambiante	°C
Tis	Température isentropique	°C
ρ	La masse volumique	Kg/m ³
Wc	Travail de compresseur	KJ/kg
WT	Travail de la turbine	KJ/kg
Wu	Travail utile	KJ/kg
CP	Chaleur spécifique	Kj/kg. K
Qcc	La quantité de chaleur dans la chambre de combustion	Kj/kg
$\dot{m}$	Débit massique	Kg/s
$\dot{m}_f$	Débit massique du combustible	Kg/s
Pc	Puissance de compresseur	MW
Pt	Puissance de la turbine	MW
Pu	Puissance utile	MW
CS	Consommation spécifique	KJ/KWh
η_c	Rendement de compresseur	%
η_T	Rendement de turbine	%
η_{Th}	Rendement théorique	%

Liste des abréviations:

TAG	Turbine a gaz
C	Compresseur
CC	Chamber de combustion
T	Turbine
CCW	Closed cooling water
CVC	Chauffage, ventilation, climatisation
GMAO	Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur
P-V	Diagramme pression volume
T-S	Diagramme température entropie

Liste des figures :

Figure. I.1 : schéma principale de la turbine à gaz	01
Figure I .2 : schéma des éléments de turbine à gaz.....	02
Figure.I .3 :production d'électricité avec une TAG à cycle simple	02
Figure. I. 4 :production d'électricité avec un centrale à cycle combinée	03
Figure. I. 5 : production d'électricité avec cogénération	03
Figure. I.6 : Classification des turbines à gaz	04
Figure.I.7 :Schéma d'une TAG mono-arbre	04
Figure. I. 8 : Schéma d'une turbine à gaz bi-arbre	05
Figure. II .1 : vue dessus de la Centrale électrique	09
Figure. II. 2 : Implantation géographique	10
Figure. II. 3 : Vision aérienne de la centrale électrique de Boufarik.....	10
Figure. II. 4 : Les groupes électrogènes	12
Figure. II.5 : Le poste de gaz	13
Figure. III.1 :Cycle théorique d'une turbine à gaz	20
Figure. III.2 :Le cycle réel de la turbine à gaz.....	20
Figure. III. 3 : Schéma d'une turbine à gaz	22
Figure. III.4 : Représentation de la notion de travail d'un compresseur	22
Figure. III.5: Représentation de la notion de travail d'une turbine	23
Figure. III.6 : Influence la température ambiante sur le travail du compresseur	36
Figure. III.7 : Influence la température ambiante sur La puissance du compresseur	37
Figure. III.8 : Influence la température ambiante sur la consommation spécifique	37
Figure. III.9 : Influence la température ambiante sur la puissance nette	38
Figure. III.10 : Influence la température ambiante sur le rendement théorique	39
Figure. IV. 1 : Les méthodes de maintenance	47
Figure. IV. 2 :Vu de la turbine à gaz	50

Figure. IV. 3 :Vanne de l'eau entier incendie après et avant la maintenance.....	51
Figure. IV. 4 : Vanne IBH après et avant la maintenance	53
Figure. IV. 5 : Pompe de l'eau après et avant la maintenance.....	55
Figure IV.6: Lavage du compresseur.....	57
Figure IV.7 :La gestion de la maintenance par logiciel coswin.....	58

Liste des tableaux :

Tableau. III.1 : condition de référence de la garantie	19
Tableau. III. 2: les données de la Journée : 20.10.2024.....	26
Tableau.III.3 :Les résultats de calcul d'après les données réelles	29
Tableau. III.4 : Les données de la Journée : 20.10.2024.....	31
Tableau. III.5 :Les résultats de calcul d'après les données réelles	32
Tableau III.6 : comparatif des résultats	34

Introduction générale

Les turbines à gaz sont des machines thermiques largement implantées à travers le monde, pour la production de l'énergie notamment dans l'industrie pétrochimique. Elles sont également utilisées dans le domaine maritime, principalement pour la propulsion des navires.

Ces machines ont pour rôle de convertir l'énergie thermique issue de la combustion d'un carburant en énergie mécanique, puis en énergie électrique. Grâce à leur fiabilité en fonctionnement, les turbines à gaz occupent une place importante dans la production d'électricité. Leur principal avantage est leur capacité à alimenter rapidement le réseau électrique, ce qui les rend précieuses en cas de besoin urgent.

Cependant, elles présentent certaines limites, notamment un rendement relativement faible et une forte sensibilité aux variations de la température ambiante. En effet, les conditions climatiques, notamment en été et en hiver, influencent directement leurs performances, en particulier la puissance générée et la consommation spécifique.

Dans ce contexte, notre étude porte sur l'analyse d'une turbine à gaz installée dans l'unité de Boufarik. Cette centrale comporte trois turbines à gaz, chacune d'une puissance de 235 MW, intégrées au réseau électrique national. La puissance totale installée atteint 704,129 MW, avec une vitesse de rotation de 3000 tr/min, correspondant à une fréquence de 50 Hz.

L'analyse repose sur des données mesurées au sein de l'unité tout au long de l'année 2024. Ce travail est structuré en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente des généralités sur les turbines à gaz utilisées pour la production d'électricité, ainsi que leur constitution.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la centrale de Boufarik et de ses équipements.
- Le troisième chapitre présente une étude thermodynamique de deux jours différents et de déterminer l'ensemble des paramètres de performances de la turbine et de déterminer l'impact de ces variations de température sur le rendement et la puissance de la turbine à gaz
- Le quatrième chapitre présente des généralités sur des concepts de base de la maintenance en général et appliquée particulièrement à la turbine à gaz 9FA avec quelque exemple de maintenance.

On achève l'étude sous la forme de synthèse par une conclusion générale

CHAPITRE I :

Généralité sur la turbine à gaz

I. 1. Introduction

Les turbines à gaz sont largement utilisées dans divers domaines industriels, notamment pour la production d'énergie mécanique.

Fonctionnant comme un moteur à combustion interne, elles aspirent et compressent l'air atmosphérique afin de le convertir en énergie mécanique. De ce fait, elles constituent des machines autonomes à écoulement continu, relevant de la catégorie des machines tournantes thermodynamiques.

I. 2. Historique de la turbine à gaz

La turbine à gaz a été inventée en 1791 par le Britannique John Barber. Sa supériorité technique et économique par rapport aux machines à vapeur à piston a été reconnue dès le 19^e siècle.

Toutefois l'insuffisance des connaissances sur les matériaux interdisait à l'époque de concrétiser les espoirs placés en elle. Il a en effet fallu attendre 1904 pour que Franz Stolze développe à Berlin une turbine à gaz capable de fonctionner, mais ne délivrant encore aucune puissance utile. [1]

I. 3. Définition de la turbine à gaz

Une turbine à gaz est un dispositif convertissant l'énergie thermique en énergie mécanique.

Elle se compose notamment d'un ou plusieurs compresseurs rotatifs, d'une chambre de combustion où le combustible est chauffé, ainsi que d'une ou plusieurs turbines.

Son fonctionnement repose également sur un système de contrôle et divers équipements auxiliaires indispensables.

Par ailleurs, tout échangeur intégré au circuit du combustible principal, à l'exception de celui destiné à la récupération de chaleur, fait partie intégrante de la turbine à gaz. [2]

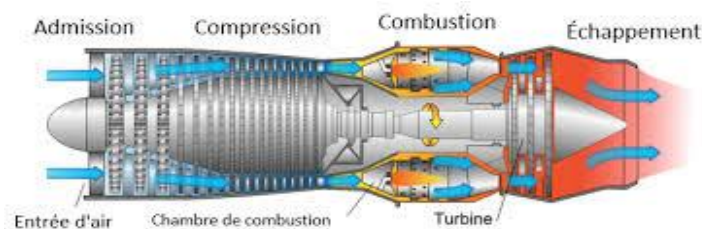


Figure I .1 : schéma principale de la turbine à gaz

I. 4. Les éléments principaux de la turbine à gaz

Une turbine à gaz est composée de trois éléments fondamentaux :

Un compresseur, peut être de type centrifuge ou axial et sert à comprimer l'air ambiant, atteignant une pression située entre 10 et 30 bars.

Une chambre de combustion, c'est l'endroit où un combustible, qu'il soit gazeux ou liquide, est injecté sous pression et brûlé en présence d'air comprimé. Un excès d'air est utilisé pour réguler la température des gaz d'échappement.

Une turbine, généralement de type axial, elle récupère l'énergie des gaz issus de la combustion en les détendant, ce qui permet de produire de l'énergie mécanique.[3]

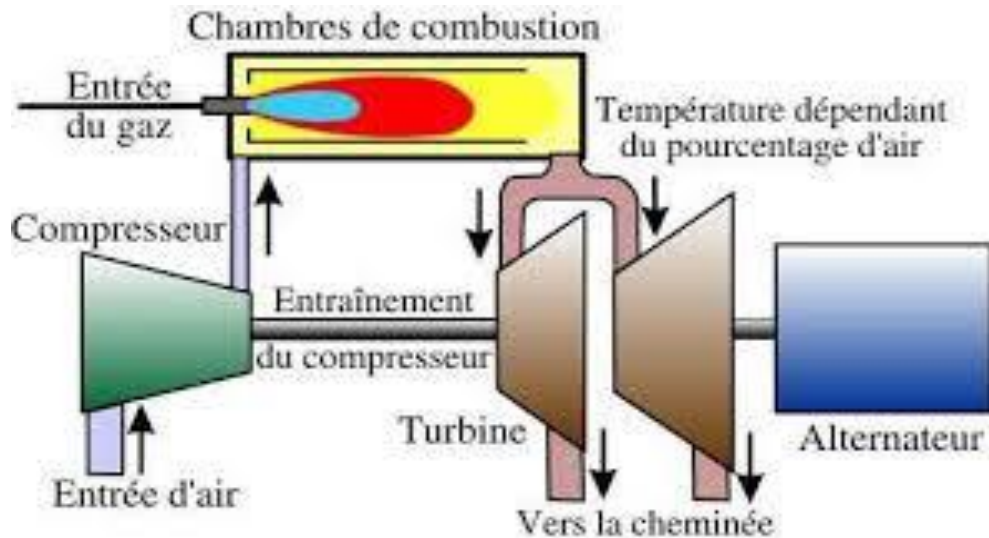


Figure. I .2 : schéma des éléments de turbine à gaz

I. 5. Les différentes centrales électriques

I .5.1 : centrale électrique à cycle simple

Les centrales électriques à cycle simple figure (I.3), se composent d'une turbine à gaz et d'un générateur électrique. Elles sont faciles à installer et de les mettre en service.

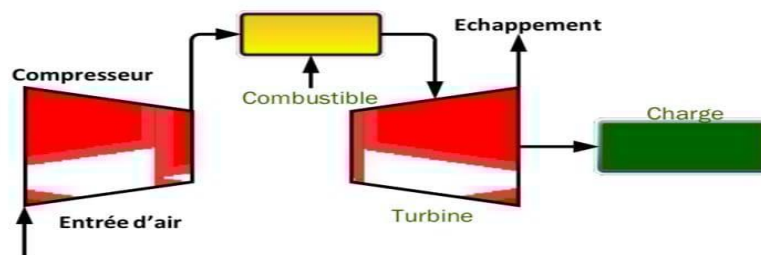


Figure. I .3 : production d'électricité avec une TAG à cycle simple

I .5.2 : centrale électrique à cycle combinée

Les centrales électriques à cycle combiné, figure (I.4), utilise les gaz d'échappement de la Turbine à gaz pour produire de la vapeur dans une chaudière de récupération de chaleur.

La vapeur produite entraîne une turbine à vapeur, ce qui améliore l'efficacité de la centrale.

Une unité à cycle combiné peut produire, à elle seule, environ 400 MW. Actuellement, ce sont les centrales électriques les plus efficaces.

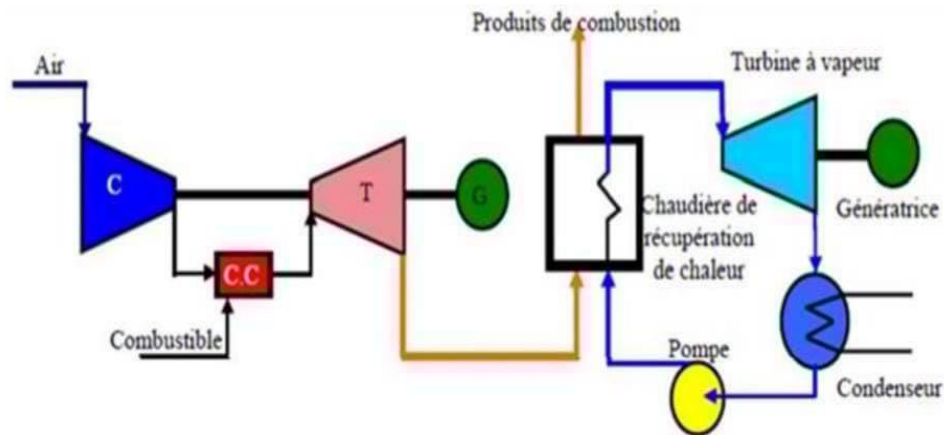


Figure. I.4 : production d'électricité avec un centrale à cycle combinée

I .5.3 : centrale de cogénération

Une variante de la centrale à cycle combiné, est une installation qui comprend une turbine à gaz et une chaudière de récupération dont la vapeur peut également servir à un procédé industriel.

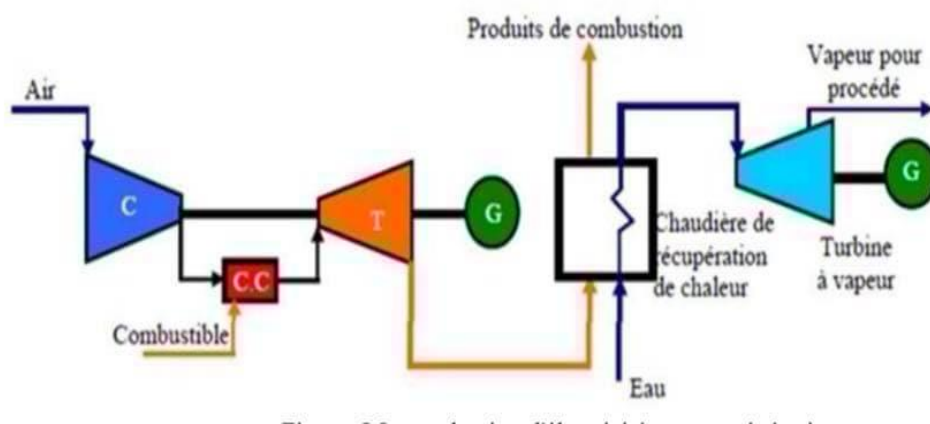


Figure I.5 : production d'électricité avec cogénération

I.6. Classification des turbines à gaz

Les turbines à gaz sont classées comme nous montre le schéma ci-dessous :

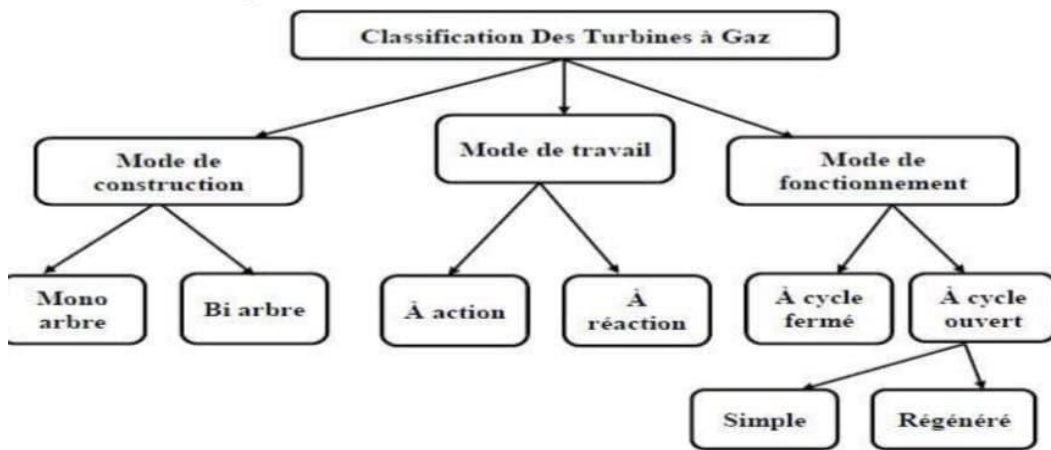


Figure I.6 : Classification des turbines à gaz [4]

I.6.1 : D'après le mode de construction

L'objectif pour lequel on utilise la turbine à gaz définit le type qu'on doit choisir. Dans l'industrie, on trouve les turbines à un seul arbre, dites aussi mono-arbre mais aussi les turbines à deux arbres dites aussi bi-arbres.

a. Turbine- mono –arbre

Compresseur et les sections de la turbine sont montés sur un même arbre ce qui permet à l'ensemble de tourner à la même vitesse. Ce type est utilisé pour les applications qui n'ont pas besoin des variations de vitesse telle que l'entraînement des génératrices pour production de l'électricité. La figure I.4 ci-dessous illustre Schéma de Développement de turbine mono arbre.

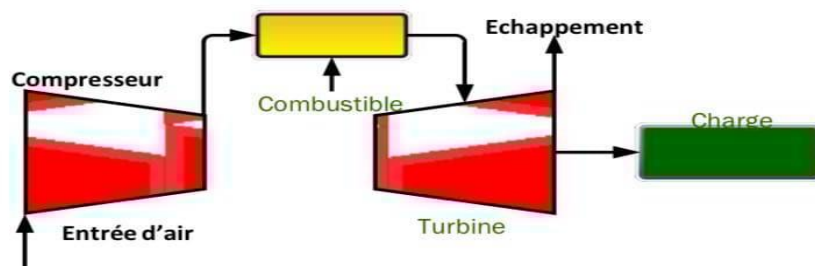


Figure I.7 : Schéma d'une TAG mono-arbre [4]

b. Turbine bi-arbre

La turbine à gaz se compose de deux roues turbines indépendantes mécaniquement. La roue turbine HP entraîne le rotor du compresseur axial et les accessoires, tandis que la roue BP deuxième étage sert à entraîner l'organe récepteur.

Le but des roues turbines non reliées est de permettre aux deux roues de fonctionner à des vitesses différentes pour satisfaire aux exigences de charge variable de l'organe récepteur. La figure ci-dessous illustre Schéma d'une turbine à gaz bi-arbre.

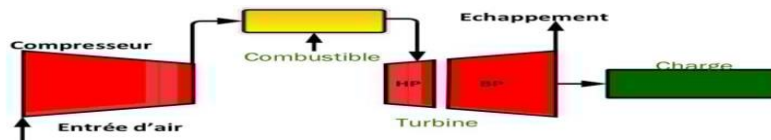


Figure. I. 8 : Schéma d'une turbine à gaz bi-arbre[4]

I .6.2. Selon mode de travail

On distingue deux types de turbine :

. Turbine à action :

Où l'énergie thermique est transformée complètement en énergie cinétique dans la directrice. L'évolution des gaz dans la roue se fait sans variation de pression statique.

• Turbine à réaction :

Une partie de l'énergie thermique est transformée dans la roue en énergie cinétique et mécanique. L'évolution des gaz dans la roue se fait avec variation de la pression statique.

I .6.3. Selon le mode de fonctionnement thermodynamique

• Turbine à gaz à cycle fermé :

Dans laquelle le même fluide est repris après chaque cycle

• Turbine à gaz à cycle ouvert :

C'est une turbine dont l'aspiration et l'échappement s'effectuent directement dans l'atmosphère, ce type de turbine qui est le plus répandu se divise en deux classes :

• Turbine à cycle simple :

C'est une turbine utilisant un seul fluide pour la production d'énergie mécanique, après la détente les gaz possédant encore un potentiel énergétique qui est perdu dans l'atmosphère à travers l'échappement.

• Turbine à cycle régénéré :

C'est une turbine dont le cycle thermodynamique fait intervenir plusieurs fluides moteurs dans le but d'augmenter le rendement de l'installation.

I .7. Principe de fonctionnement

Une turbine à gaz fonctionne de la façon suivante :

- ✓ elle extrait de l'air du milieu environnant.
- ✓ elle le comprime à une pression plus élevée par le compresseur.
- ✓ elle augmente le niveau d'énergie de l'air comprimé en ajoutant et en brûlant le combustible dans une chambre de combustion.
- ✓ 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.

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.

I .8. Domaines d'application

Les turbines à gaz ont une très grande utilité dans l'industrie, du fait qu'elles sont des appareils pour la production de l'énergie mécanique. Elles peuvent être utilisées pour l'entraînement des appareils fixes.

Ces appareils font l'objet d'un stage de formation. Ils sont destinés aux services industriels suivants :

- Transmission électrique, pour la production d'énergie électrique
- Entraînement des compresseurs.
- Entraînement des pompes.
- Procédés industriels particuliers.

I .9. Avantages et Inconvénients

a_Les avantages :

- ✓ puissance massique et volumique très élevée du fait du fonctionnement continu.
- ✓ simplicité apparente de construction et équilibrage.
- ✓ pollution limitée en NOx du fait de l'excès d'air et de la température limitées.
- ✓ aptitude à la récupération de chaleur.
- ✓ longévité en marche stationnaire.
- ✓ aptitude potentielle à utiliser des combustibles variés et de moindre qualité

b -Les inconvénients :

La turbine à gaz présente de sévères limitations dues aux contraintes techniques de sa réalisation. Ces principales limites sont les suivantes :

- ✓ taux de compression limité par le nombre d'étage de compression nécessaires.
- ✓ baisse importante de rendement des compresseurs centrifuges à un régime plus faible que le régime nominal.
- ✓ température de combustion limitée par la résistance mécanique de la turbine.
- ✓ chute importante du rendement à charge partielle en particulier pour les machines à simple arbre.
- ✓ coût d'usinage des aubages élevé notamment de la turbine.
- ✓ Inaptitude aux arrêts et démarrages fréquents et peu progressifs.

Conclusion :

Ce chapitre a évoqué l'idée et le premier brevet de la turbine à gaz datant du XVIIIe siècle, ainsi que les principes généraux de cette machine.

Nous avons également observé l'existence de plusieurs types de turbines à gaz, dont le fonctionnement et la classification varient. Leur usage est particulièrement répandu dans la production d'énergie électrique.

CHAPITRE II :
Présentation de la centrale
Boufarik 2

II. 1. Introduction

La centrale thermique de BOUFARIK II est une centrale thermique à Gaz (ou Gasoil) qui fait appel aux caractéristiques thermodynamiques de gaz naturel (ou gasoil) dans un but de transformation d'énergie.

II. 2. Présentation de la centrale BoufarikII

L'unité de production d'électricité de BOUFARIK II est située au nord de la wilaya de Blida, exactement à 4 km du chef-lieu de la daïra de Boufarik, et 34 km au sud d'Alger. Elle occupe une superficie de 15 hectares. Le choix de ce site est fait sur la base des critères suivants :

- Faire face à la demande d'énergie résultant de l'implantation dans la Région de divers aménagements industriels, agricoles et domestiques, notamment en périodes de pointes (été-hiver).
- Assurer la sécurité de l'alimentation en énergie électrique du réseau.
- Assurer un appoint au réseau national interconnecté.
- Proximité des consommateurs importants, situés notamment dans la zone industrielle Guerouaou-Boufarik.

La centrale est composée de 3 Groupes Turbo-alternateurs totalisant d'une puissance unitaire près de 235 Méga Watts totalisant une capacité totale exacte de 704,129 Méga Watts.[5]



Figure. II.1: vue de la Centrale électrique.

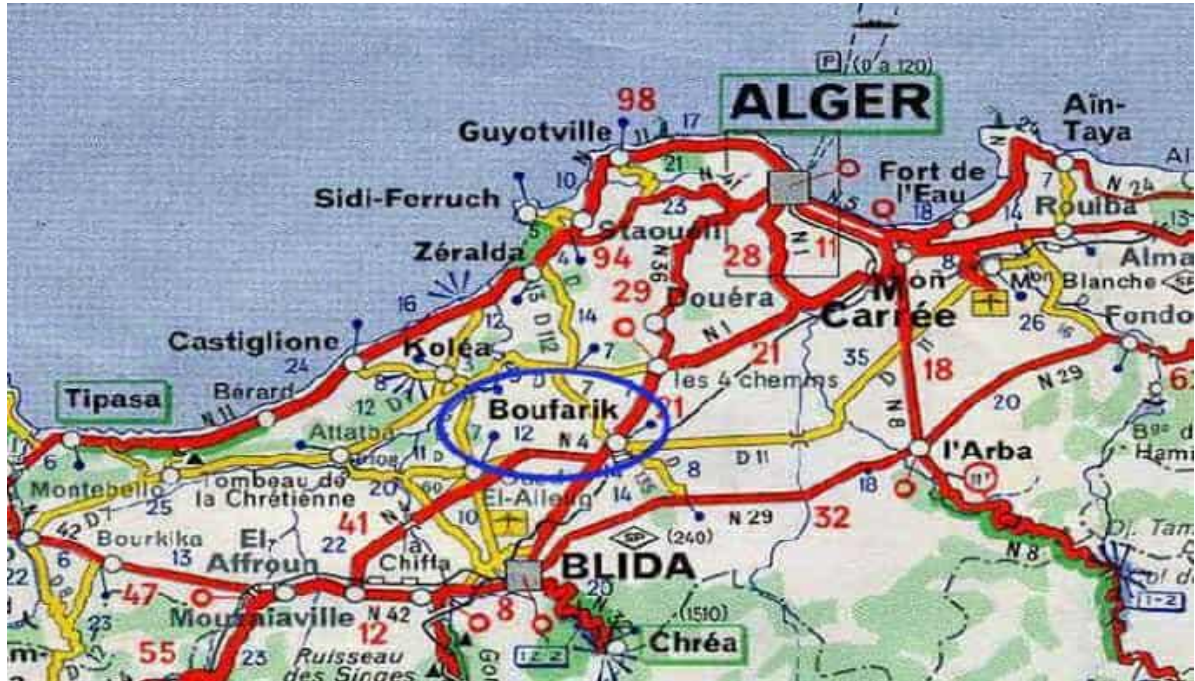


Figure. II.2: Implantation géographique.



Figure. II. 3 : Vision aérienne de la centrale électrique de Boufarik.

II.3. Fiche Technique de la Centrale : [5]

Contrat	N°02013/19/KDM-51/SPE/2013
Localisation	BOUFARIK wilaya de BLIDA
Superficie du site	15 hectares
Type de centrale	Cycle ouvert - Turbines à gaz
Nombre de groupes	03 – GE type 9FA
Puissance	704,129 MW marche en gaz en BU et aux conditions site
Tension d'évacuation	220 KV
Combustible utilisé	Gaz Naturel
Combustible de secours	Gasoil
Date de mise en vigueur	20 Octobre 2013
Délai global contractuel	14 mois

II. 4. Turbo-alternateurs et systèmes BOP :

La centrale TG et ses annexes s'étalent sur une superficie totale de 150 000 m² répartie comme suit :

II.4.1. Turbo-alternateurs :

Constructeur GE frame 9FA.03 [5]

a. Turbocompresseur : NS : 299371 GTG1, 299372 GTG2, 299373 GTG3

b. Alternateur : Type 324 LU

II.4.2. Installations BOP :

.Les groupes électrogènes

Sont des dispositifs permettant de produire de l'électricité en cas de coupure du réseau principal. Ils sont généralement alimentés par un moteur diesel et sont utilisés pour assurer la continuité de l'alimentation électrique, notamment dans des installations critiques comme les centrales électriques.

Dans le cas présenté, le démarrage de ces groupes électrogènes se fait avec une batterie ou avec un compresseur d'air selon le système utilisé.

Le poste d'évacuation 220 kV, quant à lui, est une infrastructure clé permettant de transférer l'électricité produite par la centrale vers le réseau national à haute tension.



Figure. II .4 : Les groupes électrogènes

. Le poste de gaz

Le poste de gaz de la centrale électrique de Boufarik 2 sert à recevoir le gaz naturel à haute pression, à le détendre, puis à l'envoyer vers la chaudière.

Celle-ci utilise le gaz comme source d'énergie pour chauffer. Ce chauffage est essentiel à la production d'électricité. Le poste assure également la régulation de la pression et le bon rendement du système.



Figure. II .5 : Le poste de gaz

.Le système de refroidissement et traitement des eaux

L'eau est traitée dans une station de traitement qui élimine les impuretés grâce à des produits chimiques et ajuste ses propriétés pour éviter la corrosion ou les dépôts.

Un circuit fermé d'eau appelé CCW utilisée pour refroidir six équipements essentiels de la centrale : l'huile, l'hydrogène, le générateur, le LCI, le détecteur de flamme et l'air. Après avoir absorbé la chaleur de ces équipements, l'eau retourne plus chaude vers

Le système de refroidissement, où elle est prise en charge par un ensemble de radiateurs et de ventilateurs — qui assurent son refroidissement par échange thermique avec l'air ambiant.

Une fois refroidie, elle est renvoyée vers les équipements à refroidir, assurant ainsi un cycle stable, efficace et économe en eau.

.Le système anti-incendie

Le système est conçu pour assurer une protection efficace contre les risques d'incendie dans les espaces critiques.

Il comprend principalement des systèmes à base de CO₂ pour les espaces confinés (système TONCO), ainsi que des installations à eau (H₂O) pour les zones ouvertes (système SONCO).

. La station d'air comprimé

La station joue un rôle essentiel dans le bon fonctionnement et la sécurité de l'installation. Elle fournit de l'air comprimé utilisé principalement pour l'ouverture et la fermeture automatique des vannes pneumatiques, permettant ainsi le contrôle des différents circuits (gaz, vapeur, eau).

Elle intervient également dans les systèmes de sécurité, notamment pour la gestion des gaz dangereux, en alimentant les dispositifs de détection et de purge (type ASTE gaz), afin de prévenir tout risque liés à la présence de gaz toxiques ou inflammables.

.Le système de fuel liquide

Est un ensemble d'installations conçu pour assurer l'approvisionnement en carburant des turbines à gaz, en particulier lors de situations où le gaz naturel n'est pas disponible. Ce système utilise principalement du diesel comme combustible de secours.

Il comprend des réservoirs de stockage pour le carburant, des pompes et des tuyauteries permettant de transférer le fuel vers les turbines, ainsi que des dispositifs pour chauffer et filtrer le fuel afin d'assurer son efficacité.

L'objectif principal de ce système est de garantir une continuité de la production d'énergie, même en cas de perturbations dans l'approvisionnement en gaz naturel, contribuant ainsi à la fiabilité et à la stabilité de la production électrique de la centrale.

. Les transformateurs

Les transformateurs servent à modifier la tension du courant électrique ils élévateurs augmentent la tension pour le transport d'électricité sur de longues distances, tandis que les transformateurs auxiliaires alimentent les équipements internes de la centrale.

. Bâtiment électrique

. Bâtiment de contrôle et commande

II.5. Systèmes commissionnés :

II . 5.1. Partie Mécanique :

Les systèmes suivants ont été commissionnés pour les groupes turbines GT-1, GT-2 et GT-3

- Systèmes air et échappement
- Systèmes de chauffage et de ventilation
- Systèmes d'huile de lubrification, huile hydraulique et huile de tripe
- Systèmes d'étanchéité
- Systèmes d'air d'admission et de gaz d'échappement
- Systèmes des turbines à combustion

- Systèmes de lavage à l'eau
- Systèmes de conditionnement de gaz
- Systèmes de lutte contre l'incendie par CO₂ (TOMCO)
- Groupes électrogènes
- Système azote (N₂)
- Circuit de refroidissement à eau en boucle fermée (CCW)
- Système d'eau potable
- Système d'eau de service • Système de protection contre l'incendie par eau (SANCO)
- Système d'air comprimé
- Poste gaz

II.5.2. Partie Électrique :

Les systèmes électriques suivants ont été commissionnés pour les turbines GT-1, GT-2 et GT-3 ainsi que les installations associées :

- Transformateurs principaux et auxiliaires des turbines
- Réseaux moyenne tension / basse tension (MT/BT) du BOP
- Réseaux MT/BT des groupes électrogènes
- Systèmes de lavage à l'eau des turbines
- Système de préchauffage électrique du gaz
- Système de protection incendie du BOP
- Groupes électrogènes
- Boucle de refroidissement à eau en circuit fermé (CCW)
- Réseau d'eau potable
- Réseau d'eau de service
- Système d'air comprimé

II .5.3. Partie Instrumentation :

Les systèmes d'instrumentation et de contrôle suivants ont été mis en service dans le cadre du projet, couvrant les turbines GT-1, GT-2, GT-3 ainsi que les installations annexes :

- Système de contrôle distribué (DCS)
- Système de commande des turbines à gaz (MARK VI6eS)
- Systèmes de chauffage et de ventilation des GT
- Boucles d'huile (lubrification, hydraulique et tripe)
- Systèmes d'étanchéité des turbines
- Circuits d'air d'admission et d'échappement des gaz
- Systèmes de lavage à l'eau des GT
- Systèmes de conditionnement de gaz
- Systèmes de lutte contre l'incendie par CO₂ (TOMCO)
- Postes de commande locale des groupes électrogènes
- Système d'injection d'azote (N₂)
- Boucle de refroidissement à eau fermée (CCW)
- Réseaux d'eau potable et de service
- Système de protection incendie par eau (SANCO)
- Système d'air comprimé
- Poste gaz : réchauffeur WBH, contrôle local et instrumentation
- Système CVC (chauffage, ventilation, climatisation - HVAC)
- Système de téléphonie et d'appel du personnel

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la centrale électrique de BOUFARIK II en mettant en avant sa localisation son rôle dans le réseau national sa fiche technique ainsi que ses auxiliaires système BOP et les systèmes commissionnés.

CHAPITRE III :

Simulation de la turbine à gaz 9FA

III.1. Introduction :

Les turbines sont généralement conçues par les fabricants pour fonctionner dans des conditions standard. Toutefois, en pratique, elles sont exploitées dans des régions où les conditions climatiques peuvent varier considérablement. Afin de mettre en évidence l'influence de ces variations, un calcul thermodynamique s'avère nécessaire :

- Selon la donnée standard fournie par le constructeur
- Selon les conditions climatiques réelles (notamment les températures ambiantes, qui diffèrent d'un site à l'autre).

Objet :

L'objectif de cette étude thermo dynamique de deux jours définit est de déterminer l'ensemble des paramètres et des performances de la turbine et de déterminer l'impact de ces variations de température sur le rendement et la puissance de la turbine à gaz

III.2. présentation du site Ain aicha Boufarik 2 :

Mise en service en 2016, la centrale de Boufarik 2 est une installation de production d'électricité fonctionnant en cycle simple. Réalisée par l'entreprise GAMA, elle est équipée de trois groupes comportant chacun une turbine à gaz de type 9FA, fournie par GENERAL ELECTRIC.

La puissance totale installée de la centrale atteint 704,129 MW (3×235 MW), mesurée dans les conditions spécifiques du site.

Tableau III.1 : condition de référence de la garantie

Catégorie	Paramètre	Valeur
Conditions ambiantes	Température ambiante (°C)	35
	Humidité relative (%)	75
	Pression atmosphérique (bar)	1,011
	Fréquence (Hz)	50
	Facteur de puissance	0,85
Pertes de pression (mmH ₂ O)	Perte de pression à l'admission	74,93
	Perte de pression à l'échappement	139,70
Pertes de pression (In_H ₂ O)	Chute de pression à l'admission	2,95
	Chute de pression d'échappement de base aux conditions ISO	5,5
Température de gaz	Température limite contractuelle (°C)	62

III.3. Etude du cycle thermodynamique d'une turbine à gaz :

III.3.1. Cycle de brayton :

Le cycle de Brayton théorique est le cycle idéal correspondant à la turbine à gaz élémentaire (deux isobares et deux isentropes)

. Il est principalement utilisé pour la production d'électricité.

Il existe deux types de cycles de Brayton selon qu'il soit ouvert ou refermé sur l'atmosphère. C'est la première variante qui retiendra notre attention puisque c'est celle qui est utilisée dans les centrales électriques mixtes (Turbines Gaz - Vapeurs).

a. Cycle idéal de brayton :

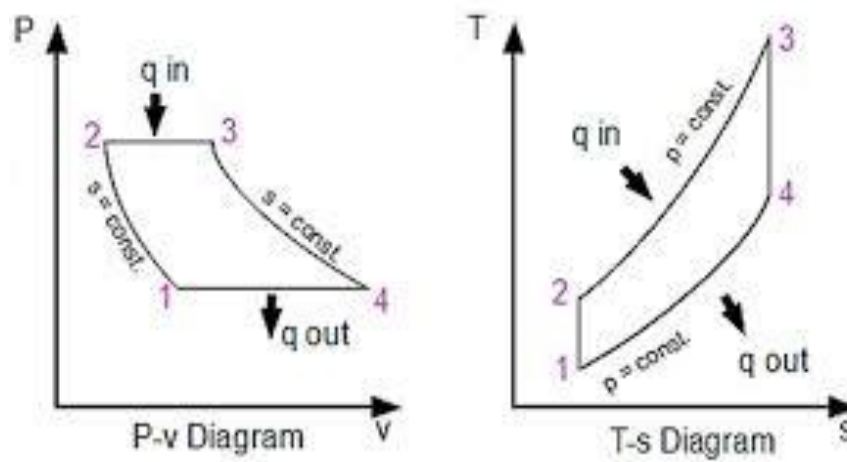


Figure. III .1 : Cycle théorique d'une turbine à gaz

- . 1 à 2 : compression isentropique de l'air (compresseur).
- . 2 à 3 : apport de chaleur isobare (chambre de combustion ou échangeur de chaleur).
- . 3 à 4 : détente isentropique (turbine).
- . 4 à 1 : rejet de chaleur isobare (échangeur de chaleur).

b. Cycle réel de brayton :

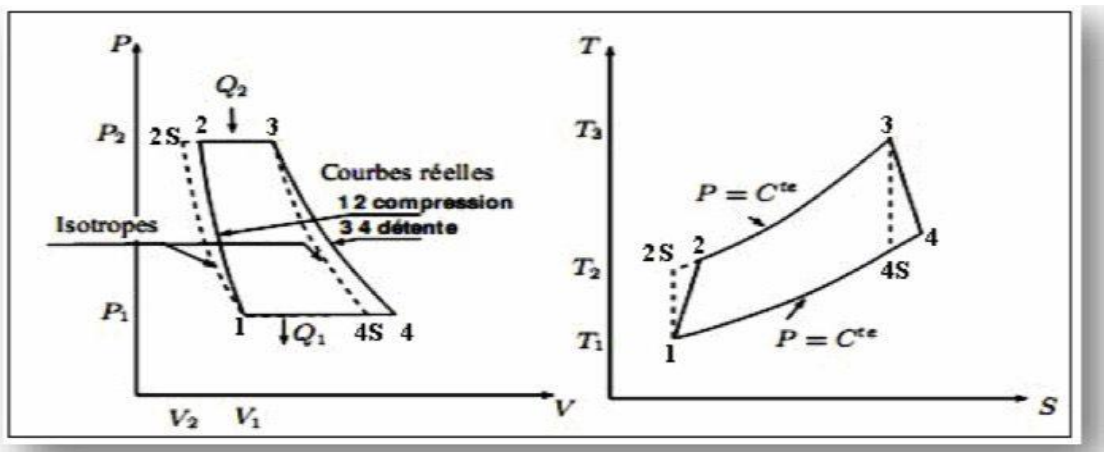


Figure. III .2 : Le cycle réel de la turbine à gaz

Le cycle réel se distingue du cycle idéal de la manière suivante :

La compression est supposée adiabatique avec un rendement isentropique noté η_{sc} . En raison des pertes par frottement, la température obtenue en fin de compression est plus élevée que celle prévue théoriquement. Ainsi, la transformation réelle ne suit plus l'arc isentropique 1-2s mais l'arc réel 1-2, avec $T_2 > T_{2s}$.

La détente dans la turbine est également adiabatique, avec un rendement isentropique η_{st} . Là encore, les frottements dégradent la transformation qui ne suit plus l'isentrope 4-5s, mais un arc réel 4-5 tel que $T_4 > T_{4s}$. [6]

III.4. Performances de la turbine à gaz :

Le calcul des points du cycle de brayton se calcule d'après le 1^{er} principe de la thermodynamique

$$Q + W = \Delta H + \Delta E_C + \Delta E_P \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$$Q = \text{Quantité de chaleur échangée} \left(\frac{\text{J}}{\text{KG}} \right)$$

$$W = \text{Travail reçu ou céder} \left(\frac{\text{J}}{\text{KG}} \right)$$

$$\Delta H = C_P \cdot \Delta T : \text{Enthalpie} \left(\frac{\text{J}}{\text{KG}} \right)$$

$$\Delta E_C = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} : \text{Énergie cinétique} \left(\frac{\text{J}}{\text{KG}} \right)$$

$$\Delta E_{P=g} (Z_2 - Z_1) : \text{Énergie potentielle} \left(\frac{\text{J}}{\text{KG}} \right)$$

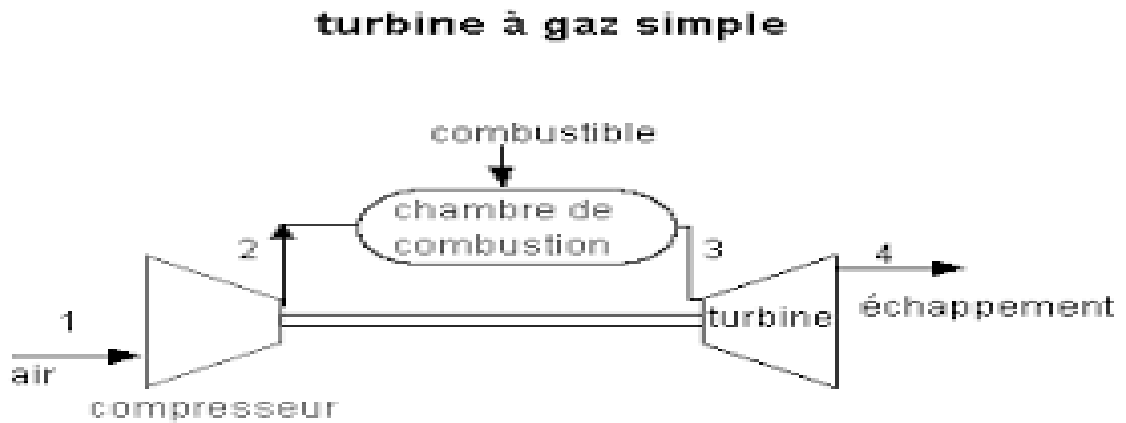


Figure. III. 3 : Schéma d'une turbine à gaz

III.4.1. Performance du cycle idéal :

Une application de la première loi de la thermodynamique au cycle idéal de Brayton

•Le compresseur :

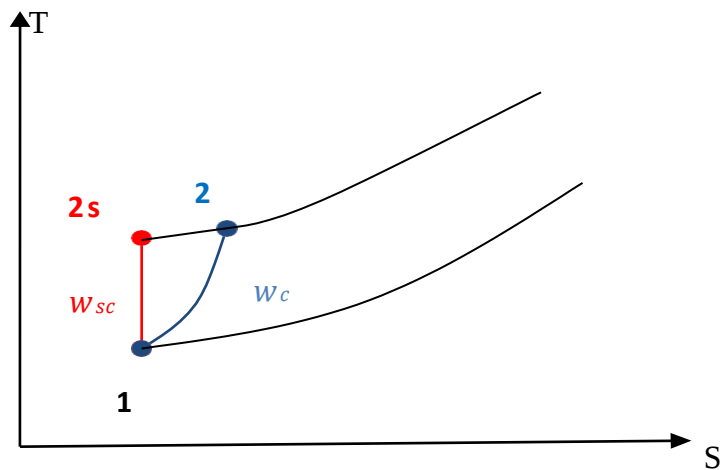


Figure. III.4 : Représentation de la notion de travail d'un compresseur

Le travail du compresseur W_C est donné par l'expression suivante :

$$W_C = (H_{2IS} - H_1) = C_{PC}(T_{2IS} - T_1) \quad (III.2)$$

Avec :

$$\frac{T_{2IS}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma_C-1}{\gamma_C}} = \pi_C^{\left(\frac{\gamma_C-1}{\gamma_C}\right)}$$

$$T_{2is} = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\left(\frac{\gamma_C - 1}{\gamma_C} \right)} \quad (III.3)$$

Donc le travail du compresseur est :

$$W_C = C_{PC} \cdot T_1 \cdot \left(\pi_C^{\frac{\gamma_C - 1}{\gamma_C}} - 1 \right) \quad (III.4)$$

$\pi_c = \frac{P_2}{P_1}$: Le taux de compression

. La chambre de combustion :

La chaleur de combustion Q_{cc} est donnée par l'expression suivante :

$$Q_{CC} = (H_3 - H_{2IS}) = C_{PCC}(T_3 - T_{2IS}) \quad (III.5)$$

Avec T_3 la température de fin de combustion

. La turbine :

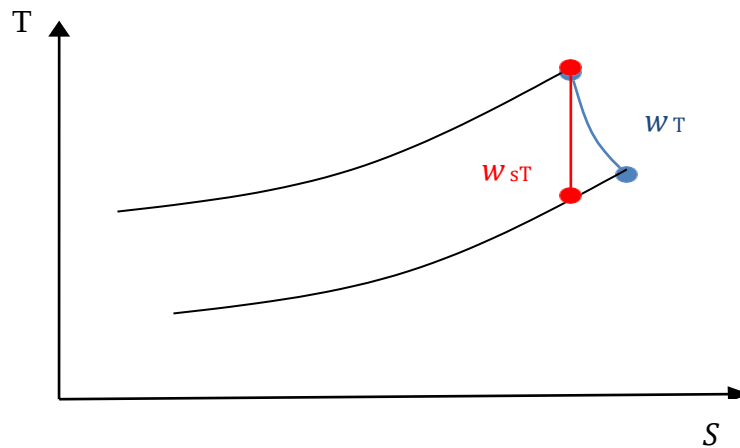


Figure. III.5 : Représentation de la notion de travail d'une turbine

Le travail de la turbine W_T est donné par l'expression suivante :

$$W_T = (H_3 - H_{4IS}) = C_{PT} (T_3 - T_{4IS}) \quad (III.5)$$

Avec :

$$T_{4IS} = T_3 \cdot \left(1 - \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\left(\frac{1 - \gamma_T}{\gamma_T} \right)} \right) \quad (III.6)$$

Donc le travail est :

$$W_T = C_{PT} \cdot T_3 \cdot \left(1 - \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\left(\frac{1-\gamma_T}{\gamma_T} \right)} \right) \quad (\text{III.7})$$

. Travail utile à la sortie :

Travail net W_U développé par la turbine à gaz de fluide pour un cycle idéal est la différence entre le travail de la détente et le travail du compresseur :

$$W_U = W_T - W_C \quad (\text{III.8})$$

. Rendement thermique du cycle :

Le rendement thermique du cycle est défini comme étant le rapport entre le travail utile de la machine sur la quantité de chaleur fournie par la combustion, donc :

$$\eta_{th} = \frac{W_U}{Q_{CC}} \quad (\text{III.9})$$

III.4.2. Performance du cycle réel :

Une application de la première loi de la thermodynamique au cycle réel de Baryton

• Le compresseur :

Le travail du compresseur W_C s'écrit :

$$W_C = (H_2 - H_1) = C_{PC} \times (T_2 - T_1) \quad (\text{III.10})$$

La température isentropique de la sortie du compresseur est :

$$T_{2is} = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\left(\frac{\gamma_C - 1}{\gamma_C} \right)}$$

Le rendement isentropique du compresseur s'écrit :

$$\eta_c = \frac{T_{2is} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (\text{III.11})$$

Donc la température réelle de la sortie du compresseur T_2 est :

$$T_2 = \frac{T_{2is} - T_1}{\eta_c} \quad (\text{III.12})$$

Le travail du compresseur devient :

$$W_C = C_{PC} \cdot T_1 \cdot \left(\frac{(\pi_C)^{\frac{\gamma_C - 1}{\gamma_C}} - 1}{\eta_c} \right) \quad (\text{III.13})$$

. La chambre de combustion :

La chaleur de combustion Q_{CC} s'écrit :

$$Q_{CC} = (H_3 - H_2) = C_{PC} \times (T_3 - T_2) \quad (III.14)$$

$$Q_{CC} = C_{PCC} \left(T_3 - \left(\frac{T_1 \left(\pi_C^{\frac{\gamma_C - 1}{\gamma_C}} - T_1 \right)}{\eta_c} + T_1 \right) \right) \quad (III.15)$$

Avec T_3 la température de la sortie de la chambre de combustion

.La turbine :

Le travail de la turbine W_T est :

$$W_T = (H_3 - H_4) = C_{PT} (T_3 - T_4) \quad (III.16)$$

La température isentropique de sortie de la turbine est :

$$T_{4IS} = T_3 \cdot \left(\left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\left(\frac{1 - \gamma_{CC}}{\gamma_{CC}} \right)} \right)$$

Le rendement isentropique de la turbine s'écrit :

$$\eta_T = \frac{T_4 - T_3}{T_{4IS} - T_3} \quad (III.17)$$

La température de sortie de la turbine devine :

$$T_4 = \eta_T \cdot (T_{4IS} - T_3) + T_3 \quad (III.18)$$

Donc le travail de la turbine est :

$$W_T = C_{PT} \cdot T_3 \cdot \eta_T \left(1 - \left(\left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{1 - \gamma_T}{\gamma_T}} \right) \right) \quad (III.19)$$

• Travail utile à la sortie :

Le travail net W_U développé par la turbine à gaz est :

$$W_U = W_T - W_C \quad (III.20)$$

• Rendement thermique du cycle :

À partir de l'équation (III.8) donc :

$$\eta_{Th} = \frac{W_U}{Q_{CC}} \quad (III.21)$$

Les équations utilisées qui ont été donnée par [5]

III.5. Calcul thermodynamique :

III.5.1. Calculs des paramètres et performance de la journée (20.10.2024) :

Tableau III.2 : les données de la Journée : 20.10.2024

Paramètres	Valeurs
Puissance fournie (MW)	268.09
Température d'entrée d'air (°C)	20,4
Débit massique d'air (kg/s)	725
Perte de Pression à l'admission (%)	3
Taux de compression (π_c)	15.64
Température d'entrée dans la chambre de combustion (K)	675.8
Température de fin de combustion (K)	1370
Température d'échappement (°C)	505.1
Pression atmosphérique (Bar)	1.012
Pression d'échappement (Bar)	1.103
Rapport débit massique de combustible sur d'air (f)	0.023
CpC (J/kg.K)	1002.28
CpCc (J/kg.K)	1072.99
CpT (J/kg.K)	1269.12
γ_c (gamma)	1.4
γ_{cc} (gamma)	1.3

Entrée d'air du diffuseur :

-La pression

C'est la pression atmosphérique

$$P_0 = P_{atm} = 1,012 \text{ Bar} \quad (\text{III.22})$$

-La température

C'est la température de l'air ambiant

$$T_0 = T_{amb} = 20,4 \text{ } ^\circ\text{C} = 293,4 \text{ K} \quad (\text{III.23})$$

- La masse volumique

Comme l'air est un gaz parfait, on applique :

$$\rho_0 = \frac{P_0}{R \cdot T_1} = \frac{1,012 \cdot 10^5}{287 \cdot 293,4} = 1,201 \text{ Kg/m}^3 \quad (\text{III.24})$$

Avec r la constante des gaz parfait égal 287 J/Kg. K

Entrée de compresseur : (compression adiabatique)

- La température

$$T_1 = 293,4 \text{ K} \quad (\text{III.25})$$

- La pression

À cause de perte de pression dues à la filtration d'air :

$$P_1 = 0,98 \text{ Bar} \quad (\text{III.26})$$

- La masse volumique

$$\rho_1 = \frac{P_1}{r \cdot T_1} = \frac{0,98 \cdot 10^5}{287 \cdot 293,4} = 1,163 \text{ Kg/m}^3 \quad (\text{III.27})$$

Entrée de la chambre de combustion :

- La pression

Le taux de compression est donné :

$$\pi_c = \frac{P_2}{P_1} = 15,64 \quad (\text{III.28})$$

$$\pi_c = \frac{P_2}{P_1} \rightarrow P_2 = \pi_c \cdot P_1 = 15,64 \cdot 0,98 = 15,33 \text{ bar} \quad (\text{III.29})$$

- La température

$$T_2 = 402,8 \text{ } ^\circ\text{C} = 675,8 \text{ K} \quad (\text{III.30})$$

$$T_{2is} = T_1 \cdot \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma_c - 1}{\gamma_c}} \right) = 293,4 \cdot \left(15,64^{\frac{1,4 - 1}{1,4}} \right) = 643,68 \text{ K} \quad (\text{III.31})$$

- La masse volumique

$$\rho_2 = \frac{P_2}{r \cdot T_2} = \frac{15,33 \cdot 10^5}{287 \cdot 675,8} = 7,90 \text{ Kg/m}^3 \quad (\text{III.32})$$

- Le débit massique du combustible

$$m \times m_f = 0,023 \cdot 725 = 16,675 \text{ Kg/s} \quad (\text{III.33})$$

Entrée de la turbine :

- La pression

$$P_3 = 15,33 \text{ Bar} \quad (\text{III.34})$$

. La température

La température de fine de combustion et d'entrée de la turbine T_3 est donne :

$$T_3 = 1370 \text{ K} \quad (\text{III.35})$$

- La masse volumique

$$\rho_3 = \frac{P_3}{r \cdot T_3} = \frac{15,33 \cdot 10^5}{287 \cdot 1370} = 3,898 \text{ Kg/m}^3 \quad (\text{III.36})$$

Sortie de la turbine (échappement):

. La pression

La pression d'échappement est donne

$$P_4 = 1,103 \text{ Bar} \quad (\text{III.37})$$

- La température

La température d'échappement est :

$$T_4 = 505,1 \text{ } ^\circ\text{C} = 778,1 \text{ K} \quad (\text{III.38})$$

$$T_{4is} = T_3 \cdot \left(\left(\frac{P_3}{P_1} \right)^{\frac{1-\gamma_{CC}}{\gamma_{CC}}} \right) = 1370 \cdot \left(\left(\frac{15,33}{1,03} \right)^{\frac{1-1,3}{1,3}} \right) = 734,67 \text{ K} \quad (\text{III.39})$$

- La masse volumique

$$\rho_4 = \frac{P_4}{r \cdot T_4} = \frac{1,103 \cdot 10^5}{287 \cdot 778,1} = 0,493 \text{ Kg/m}^3 \quad (\text{III.40})$$

Tableau III.3 : les résultats de calcul d'après les données réelles

Les pressions	Les températures	Les mass volumiques
P0=1,012 bar	T0=293,4 K	$\rho_0=1,201 \text{ kg/m}^3$
P1=0,98 bars	T1=293,4 K	$\rho_1=1,163 \text{ kg/m}^3$
P2=15,33 bars	T2=675,8 K	$\rho_2=7,90 \text{ kg/m}^3$
P3=15,33 bars	T3=1370 K	$\rho_3=3,898 \text{ kg/m}^3$
P4=1,103 bars	T4=778,1 K	$\rho_4=0,493 \text{ kg/m}^3$

- Travail de compresseur :

$$W_C = C_{PC} \times (T_2 - T_1) = 1002,28 \times (402,8 - 20,4) \quad (\text{III.41})$$

$$W_C = 383271,87 \frac{\text{J}}{\text{Kg}} = 383,27 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \quad (\text{III.42})$$

-Puissance de compresseur :

$$P_C = W_C \times m = 383,27 \times 725 \quad (\text{III.43})$$

$$P_C = 277870,75 \text{ W} = 277,87 \text{ MW} \quad (\text{III.44})$$

-Rendement de compresseur :

$$\eta_c = \frac{T_{2is} - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{634,68 - 293,4}{675,8 - 293,4} \quad (\text{III.45})$$

$$\eta_c = 0,91 = 91\% \quad (\text{III.46})$$

-La quantité de chaleur dans la chambre de combustion :

$$Q_{CC} = C_{PC} \times (T_3 - T_2) = 1072,99 \times (1370 - 675,8) \quad (\text{III.47})$$

$$Q_{CC} = 744869,65 \frac{J}{Kg} = 744,87 \frac{KJ}{Kg} \quad (\text{III.48})$$

- Travail de la turbine :

$$W_T = C_{PT} \times (T_3 - T_4) = 1269,52 \times (1370 - 778,1) \quad (\text{III.49})$$

$$W_T = 751,42 \frac{KJ}{Kg} \quad (\text{III.50})$$

- Puissance de la turbine :

$$P_T = W_T \times m = 751,42 \times 725 \quad (\text{III.51})$$

$$P_T = 544,77 \text{ MW} \quad (\text{III.52})$$

- Rendement de la turbine :

$$\eta_T = \frac{T_4 - T_3}{T_{4is} - T_3} = \frac{778,1 - 1370}{734,67 - 1370} \quad (\text{III.53})$$

$$\eta_T = 0,93 = 93\% \quad (\text{III.54})$$

- Travail net de cycle :

$$W_U = W_T - W_C = (751,42 - 383,27) \quad (\text{III.55})$$

$$W_U = 368,15 \frac{KJ}{Kg} \quad (\text{III.56})$$

- puissance net de cycle :

$$P_U = P_T - P_C = (544,77 - 277,87) \quad (\text{III.57})$$

$$P_U = 266,9 \text{ MW} \quad (\text{III.58})$$

- Rendement thermique :

$$\eta_{Th} = \frac{W_U}{Q_{CC}} = \frac{368,15}{774,68} \quad (\text{III.59})$$

$$\eta_{Th} = 0,46 = 46\% \quad (\text{III.60})$$

-consommation spécifique :

$$C_s = \frac{mf}{P_U} = \frac{16,675 \times 3600}{266,9} \quad (\text{III.61})$$

$$C_s = 0,22 \frac{\text{Kg}}{\text{kWh}} \quad (\text{III.62})$$

III.5.2. Calculs des paramètres et performance de la journée (21.06.2024) :

Tableau III.4 :Les données de la Journée : 21.06.2024

Paramètre	Valeur
Puissance fournie (MW)	180
Température d'entrée d'air (°C)	35
Débit massique d'air (kg/s)	720
Pente de Pression à l'admission (%)	2
Taux de compression (π_c)	10.49
Température d'entrée dans la chambre de combustion (°C)	420.67
Température de fin de combustion (K)	1400
Température d'échappement (°C)	626.66
Pression atmosphérique (Bar)	1.014
Pression d'échappement (Bar)	1.03
Rapport débit massique de combustible sur d'air (f)	0.018
CpC (J/kg.K)	1002.28
CpCc (J/kg.K)	1072.99
CpT (J/kg.K)	1269.12
γ_c (gamma)	1.4
γ_{cc} (gamma)	1.3

Entrée d'air du diffuseur :

$$P_0 = P_{atm} = 1,014 \text{ Bar}$$

$$T_0 = T_{amb} = 35 \text{ }^\circ\text{C} = 308 \text{ K}$$

$$\rho_0 = 1,147 \text{ Kg/m}^3$$

Entrée de compresseur : (compression adiabatique)

$$P_1 = 0,99 \text{ Bar}$$

$$T_1 = 308 \text{ K}$$

$$\rho_1 = 1,119 \text{ Kg/m}^3$$

Entrée de la chambre de combustion :

$$P_2 = 10,38 \text{ Bar}$$

$$T_2 = 693,67 \text{ K}$$

$$T_{2is} = 602,75 \text{ K}$$

$$\rho_2 = 5,213 \text{ Kg/m}^3$$

$$\dot{m} \cdot f = 12,996 \text{ Kg/s}$$

Entrée de la turbine :

$$P_3 = 10,38 \text{ Bar}$$

$$T_3 = 1400 \text{ K}$$

$$\rho_3 = 2,583 \text{ Kg/m}^3$$

Sortie de la turbine (échappement) :

$$P_4 = 1,03 \text{ Bar}$$

$$T_4 = 899,66 \text{ K}$$

$$T_{4is} = 821,45 \text{ K}$$

$$\rho_4 = 0,398 \text{ Kg/m}^3$$

Tableau III.5 : Les résultats de calcul d'après les données réelles

Les pressions	Les températures	Les mass volumiques
P0=1,014 bar	T0=308K	$\rho_0=1,147 \text{ kg/m}^3$
P1=0,99 bar	T1=308 K	$\rho_1=1,119 \text{ kg/m}^3$
P2=10,38 bar	T2=693,67 K	$\rho_2=5,213 \text{ kg/m}^3$
P3=10,38 bar	T3=1400 K	$\rho_3=2,583 \text{ kg/m}^3$
P4=1,03 bar	T4=899,66 K	$\rho_4=0,398 \text{ kg/m}^3$

- Travail de compresseur :

$$W_C = 386,54 \frac{KJ}{Kg}$$

- Puissance de compresseur :

$$P_C = 279,08 \text{ MW}$$

- Rendement de compresseur :

$$\eta_c = 94\%$$

- La quantité de chaleur dans la chambre de combustion :

$$Q_{CC} = 737,88 \frac{KJ}{Kg}$$

- Travail de la turbine :

$$W_T = 635,19 \frac{KJ}{Kg}$$

- Puissance de la turbine :

$$P_T = 458,60 \text{ MW}$$

- Rendement de la turbine :

$$\eta_T = 86\%$$

- Travail net de cycle :

$$W_U = 248,65 \frac{Kj}{Kg}$$

- puissance net de cycle :

$$P_U = 179,52 MW$$

- Rendement thermique :

$$\eta_{Th} = 33\%$$

-consommation spécifique :

$$C_s = 0,26 \frac{Kg}{kWh}$$

III.5.3. Comparaison des résultats :

Le tableau ci-dessus présente les résultats de calculs pour deux températures différentes

Tableau III.6 : comparatif des résultats

Paramètres	20. AVRIL.2024	21.JUIN.2024
Tamb (K)	293,4	308
Wc (KJ/kg)	383,27	386,54
WT (KJ/kg)	751,42	635,19
Wu (KJ/kg)	368,15	248,65
Pc (MW)	277,87	279,08
PT (MW)	544,77	458,60
PU (MW)	266,9	179,52
η_c (%)	91	94
η_T (%)	93	86
η_{Th} (%)	46	33
Cs (kg/kW.h)	0,22	0,26

Résultats et discussion :

Les résultats issus de notre étude révèlent une tendance nette : les performances des turbines à gaz diminuent avec l'élévation de la température ambiante. Cette évolution a été confirmée par les calculs effectués manuellement, ce qui renforce la cohérence et la fiabilité de l'analyse.

III.6. Présentation du logiciel EES:

Engineering Equation Solver (EES) est un logiciel commercial largement utilisé pour résoudre des systèmes d'équations non linéaires. Il propose de nombreuses fonctions et équations spécialisées, particulièrement adaptées aux domaines de la thermodynamique et du transfert de chaleur. Cela en fait un outil précieux pour les ingénieurs en mécanique œuvrant dans ces secteurs.

Le logiciel offre également des tableaux paramétriques permettant à l'utilisateur de comparer simultanément plusieurs variables. Ces tableaux peuvent aussi servir à générer des graphiques. EES peut être utilisé à la fois via du code et par le biais des tableaux.

Par ailleurs, EES est particulièrement efficace pour les études de conception, où il est nécessaire d'analyser l'impact de différents paramètres. Cette fonctionnalité est rendue possible grâce à l'option de Table Paramétrique offerte par le logiciel.

III.7. Les courbes de performance en fonction de la température ambiante :

Pour faire les graphes nous avons utilisé le logiciel EES, pour observer les variations de travail et la puissance de compresseur, le travail et la puissance de turbine et la consommation spécifique et la puissance net de cycle et le rendement en fonction de la température ambiante 20°C et 35°C.

On a obtenu les résultats des performances de turbine portés sur les graphes suivant :

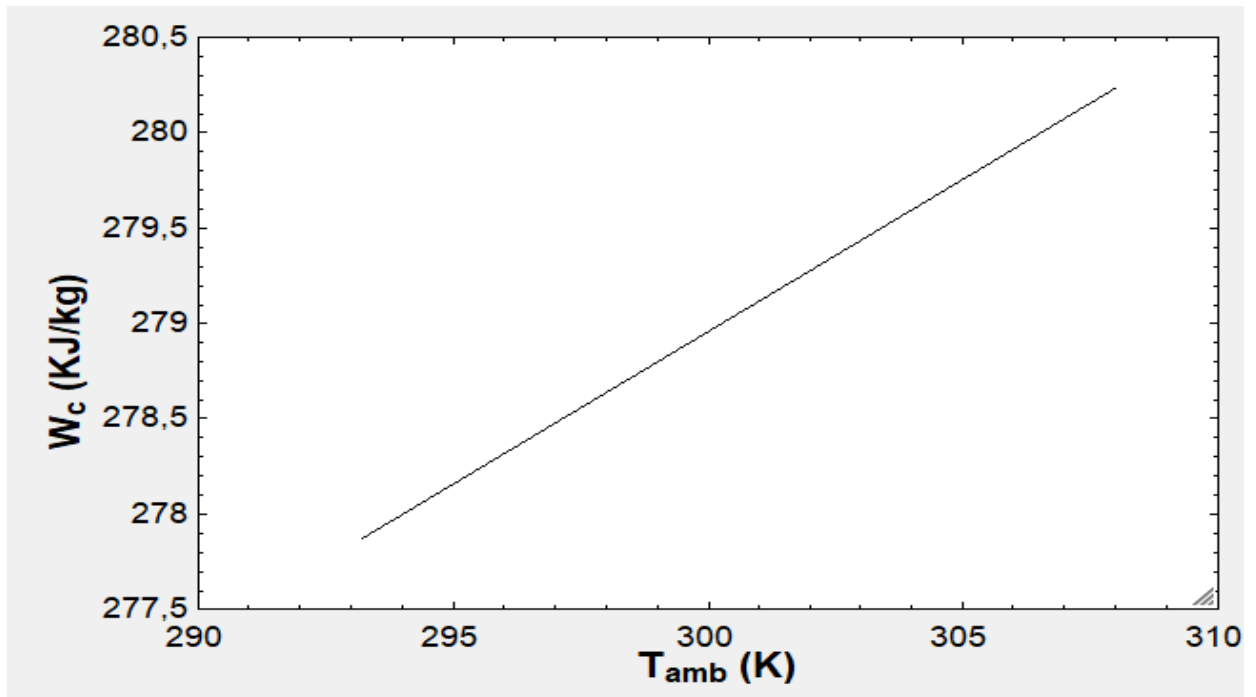


Figure. III.6 : Influence la température ambiante sur le travail du compresseur

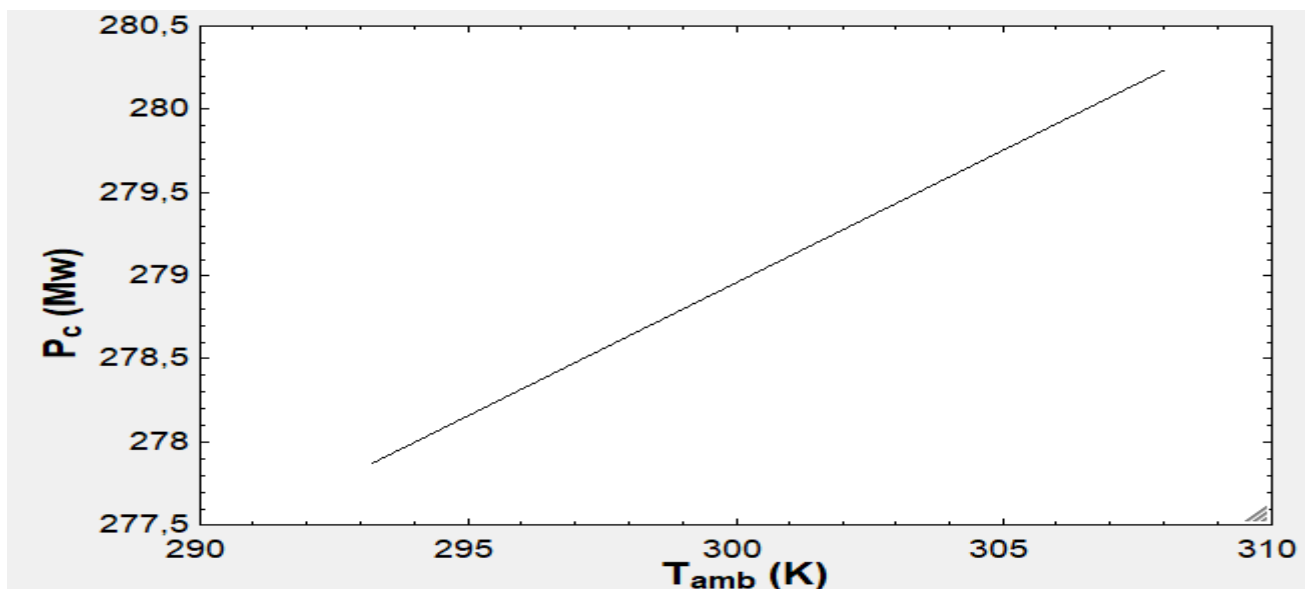


Figure. III.7 : Influence la température ambiante sur La puissance du compresseur

La figure(III.5) et (III.6) représente le travail de compresseur et la puissance de compresseur en fonction de température ambiante, nous remarquons une augmentation linéaire de travail et la puissance du compresseur.

Lorsque la température ambiante augmente, la densité de l'air diminue, ce qui oblige le compresseur à aspirer un plus grand volume d'air pour maintenir le même débit massique nécessaire à la combustion. Cette augmentation du volume entraîne une élévation du travail

mécanique requis pour comprimer l'air à la pression désirée. De plus, un air plus chaud à l'entrée du compresseur entraîne une température de sortie encore plus élevée, ce qui nécessite davantage d'énergie pour la compression. En conséquence, la puissance absorbée par le compresseur augmente, réduisant la puissance nette disponible à la sortie de la turbine et affectant négativement le rendement global de la machine.

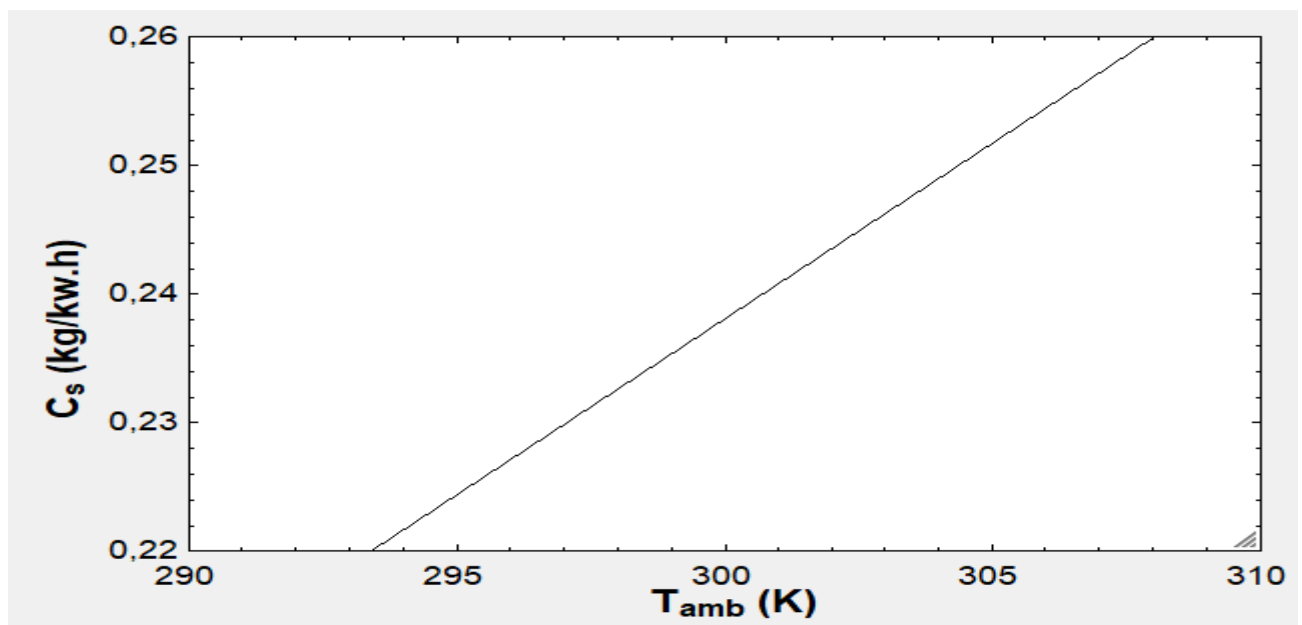


Figure. III.8 : Influence la température ambiante sur la consommation spécifique

D'après la figure (III.9) nous remarquons que la consommation spécifique augmente quand la température ambiante augmente.

Lorsque la température ambiante augmente, la consommation spécifique d'une turbine à gaz s'élève principalement à cause de la diminution de la densité de l'air. En effet, un air plus chaud est moins dense, ce qui réduit la masse d'air admise dans le compresseur et donc la quantité d'oxygène disponible pour la combustion. Cette baisse de l'oxygène limite l'efficacité de la combustion, obligeant la turbine à consommer plus de carburant pour produire la même puissance. Par ailleurs, la puissance nette générée diminue, car la différence de température entre l'entrée et la sortie de la turbine est réduite, ce qui diminue le rendement thermodynamique du cycle. Ainsi, à température ambiante élevée, la turbine devient moins performante et nécessite plus de carburant par unité d'énergie produite, ce qui entraîne une augmentation de la consommation spécifique.

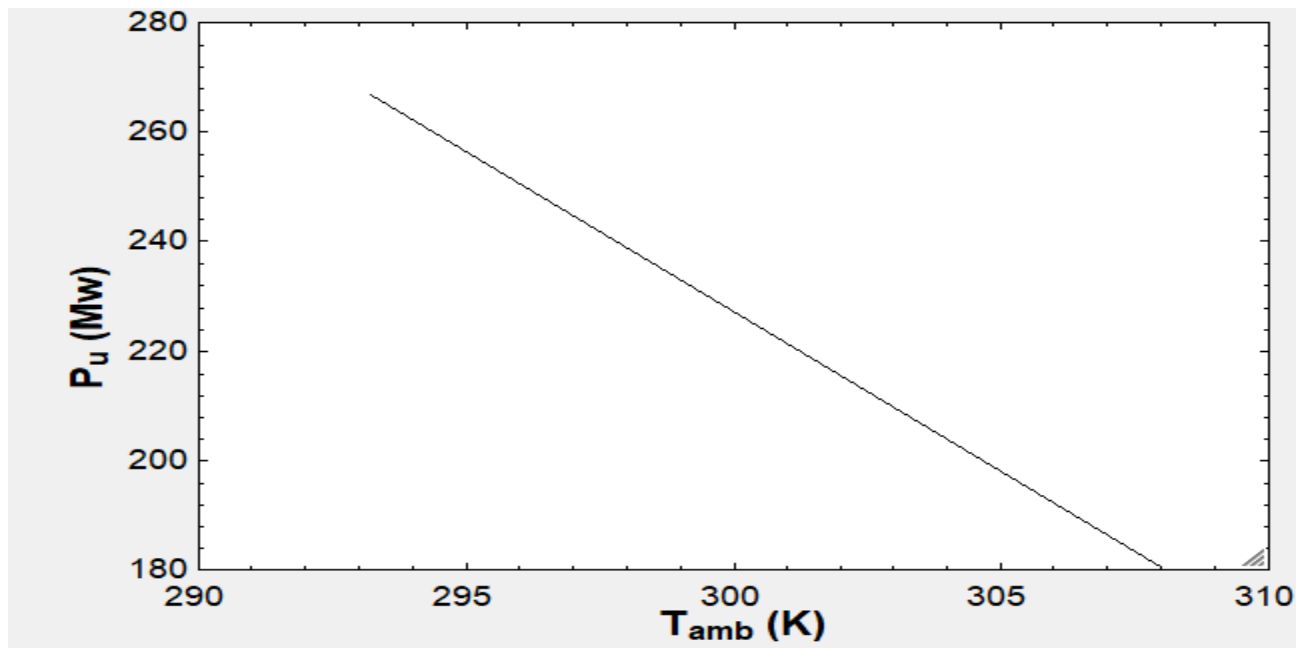


Figure. III.9 : Influence la température ambiante sur la puissance nette

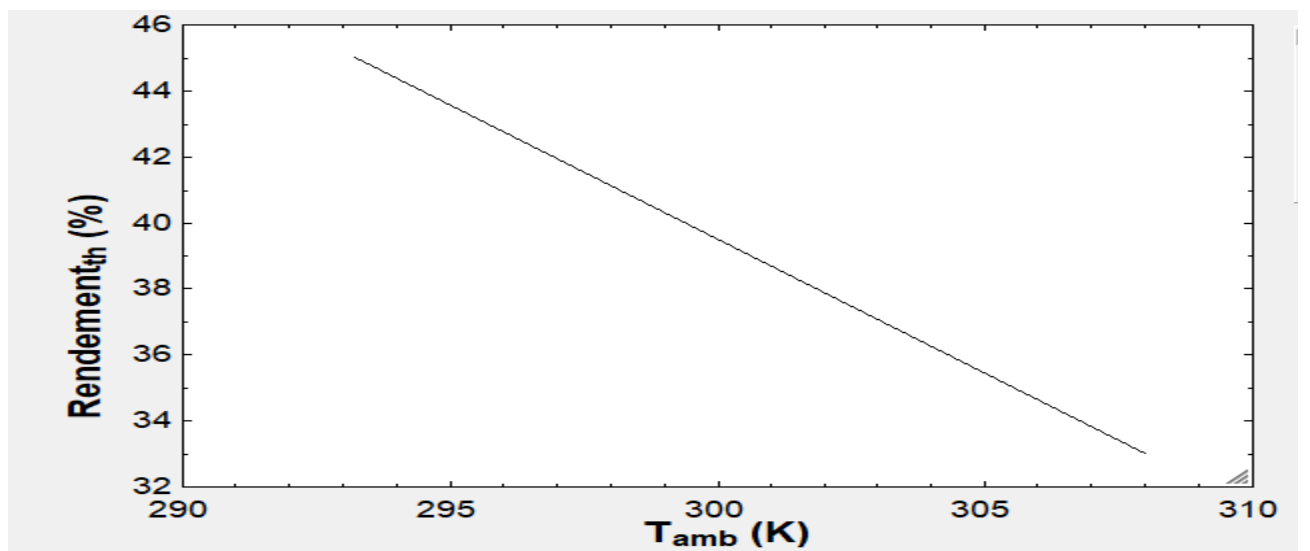


Figure. III.10 : Influence la température ambiante sur le rendement théorique

On remarque d'après les figures (II.10) et (II.11) que le rendement de la turbine à gaz et sa puissance utile ont subi une baisse considérable. Ceci est dû à l'augmentation de la température d'admission, donc on affirme que la température ambiante a une importante influence sur la performance de notre turbine. Selon l'étude faite à une température ambiante de 20,4°C, le rendement

Globale de la machine est de 46% et sa puissance utile est de 266,9MW, tandis que le rendement global ainsi que la puissance utile calculés à une température de 35 °C sont respectivement 33 % et 179,52 MW. Cette baisse est due au fait que le débit massique

diminue, ce qui entraîne la diminution de la puissance utile de la turbine donc de son rendement, car ces deux grandeurs sont proportionnelles.

III.8. Influence des facteurs sur les performances de la turbine à gaz :

III.8.1. Influence des facteurs extérieurs sur les performances La turbine à gaz :

Utilise l'air atmosphérique, ce qui la rend sensible aux conditions environnementales qui affectent le débit massique de l'air aspiré par le compresseur.

Les principaux facteurs environnementaux influençant les performances sont :

- La température ambiante
- La pression atmosphérique
- L'humidité de l'air
- La présence de poussières

III.8.1.1. Température ambiante :

Lorsque la température de l'air admis au compresseur augmente, la masse volumique de l'air diminue. Cela entraîne une réduction du débit massique d'air, ce qui diminue à son tour le rendement et la puissance utile de la turbine.

III.8.1.2. Pression atmosphérique :

Une baisse de la pression atmosphérique par rapport à une valeur de référence diminue la masse volumique de l'air. En conséquence, le débit massique d'air est réduit, ce qui entraîne une baisse de la puissance fournie par la turbine.

III.8.1.3 – Humidité relative :

L'air humide est moins dense que l'air sec. Ainsi, une augmentation de l'humidité relative provoque une diminution de la puissance générée et une augmentation de la consommation spécifique.

III.8.1.4. Les poussières :

Lorsque la concentration de poussières dans l'air augmente (par exemple en présence de vent chargé de sable), la quantité d'air pouvant être aspirée par le compresseur diminue. Cela entraîne une baisse de la puissance développée par la turbine.

III.8.2. Influence des facteurs intérieurs sur les performances de la TAG :

En plus des facteurs extérieurs précédemment évoqués, certains éléments internes à la turbine à gaz peuvent également avoir un impact significatif sur ses performances. Ces

facteurs sont qualifiés d'internes, car ils sont directement liés aux équipements auxiliaires de la machine. Les principaux facteurs internes sont :

- Les pertes de charge dans la ligne d'admission du compresseur
- Les pertes de charge dans le système d'échappement
- Le type de combustible utilisé

III.8.2.1. Pertes de charge dans la section d'admission du compresseur :

Les pertes de pression dans la ligne d'aspiration sont provoquées par les éléments du système d'admission, tels que les filtres à air, silencieux, coudes et variations de section des conduits. Ces éléments, situés en amont de l'entrée du compresseur, génèrent des frottements qui diminuent la pression et le débit d'air. Cela réduit la puissance générée par la turbine et augmente la consommation spécifique, tout comme les effets d'une pression atmosphérique réduite.

III.8.2.2. Pertes de charge dans le système d'échappement :

Les pertes dans les systèmes d'échappement sont dues aux frottements rencontrés par les gaz à travers les coudes, diffuseurs ou autres composants. Ces pertes augmentent la contre-pression par rapport à la pression atmosphérique de référence, ce qui limite la détente dans la turbine. La turbine s'arrête ainsi à une pression plus élevée que prévu, réduisant la puissance disponible et augmentant la consommation spécifique.

III.8.2.3 – Influence du type de combustible :

Les performances de la turbine à gaz sont meilleures lorsqu'on utilise du gaz naturel plutôt que du gasoil. En effet, à charge partielle et dans des conditions constantes (température ambiante, pertes de charge, etc.), la puissance fournie est environ 2 % plus élevée avec le gaz naturel. De plus, la consommation spécifique est plus faible, avec une réduction de l'ordre de 0,7 à 1 %, selon le modèle de turbine. Ces écarts deviennent encore plus significatifs lorsqu'on compare le gaz naturel à des combustibles plus lourds, comme les résidus de raffinage. Cela s'explique par le pouvoir calorifique supérieur du gaz naturel ainsi que par la meilleure qualité des gaz produits lors de sa combustion.

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a fait des calculs thermodynamiques de deux jours défèrent le 20 octobre2024 (20,4°C) et le 21 juin (35°C) pour déterminer l'ensemble des paramètres et des performances de la turbine et de déterminer l'impact de ces variations de température sur le rendement et la puissance de la turbine à gaz

A partir de ce calcul thermodynamique, on peut voir clairement l'influence très importante de la température ambiante de l'air sur les performances, la puissance diminue quand la température de l'air atmosphérique aspiré augmente. Cela a naturellement aussi son influence sur la diminution de rendement thermique de la turbine à gaz ce qui influe négativement sur l'exploitation de la turbine.

CHAPITRE IV :

Maintenance de la turbine à gaz

IV.1. Introduction :

La maintenance a pour objectif principal de garantir la disponibilité maximale des unités de production et de leurs équipements annexes, tout en réduisant au minimum les interruptions coûteuses.

Longtemps perçue comme une activité secondaire et considérée comme un poste de dépense superflu, la maintenance a souvent été assimilée à de simples interventions de dépannage sur des équipements sujets à l'usure et au vieillissement.

En réalité, la maintenance joue un rôle bien plus large. Elle représente une recherche constante d'équilibre entre exigences techniques et contraintes économiques. Sa pleine portée reste encore méconnue, bien que sa contribution à la performance productive soit essentielle. Pour remplir efficacement cette mission, la maintenance nécessite des ressources humaines qualifiées ainsi que des moyens matériels adaptés. Elle ne doit pas être reléguée au rang d'activité subalterne pour un personnel inapte à la production. Au contraire, elle doit disposer d'un budget adéquat lui permettant d'exercer une fonction stratégique bien au-delà d'un simple service de dépannage.

IV.2. Définition de la maintenance :

Depuis 2001, une nouvelle définition de la maintenance a été adoptée au niveau européen, conformément à la norme NF EN 13306 X 60-319 : « Ensemble des actions techniques, administratives et de gestion entreprises au cours du cycle de vie d'un bien, ayant pour but de le maintenir ou de le restaurer dans un état lui permettant de remplir la fonction attendue. » (Extrait de la norme NF EN 13306 X 60-319 de juin 2001) [8]

IV.3. Rôle de la maintenance :

La maintenance a pour vocation de garantir la rentabilité des investissements matériels de l'entreprise. Elle vise à préserver le potentiel opérationnel des installations tout en s'alignant sur les orientations stratégiques de l'organisation. [9]

IV.4. Objectifs de la Maintenance

Un service de maintenance est essentiel pour assurer le bon fonctionnement des équipements et réduire les pannes, dont le coût peut être élevé.

- Maintenir un niveau de propreté irréprochable. Les objectifs principaux de la maintenance sont les suivants :
- Garantir en continu la production tout en limitant les coûts de fonctionnement et d'entretien.
- Assurer la fiabilité et la disponibilité des équipements.

- Mettre en place une organisation efficace des ressources matérielles modernes et des ressources humaines qualifiées, compétentes et bien formées.
- Préserver la valeur patrimoniale des équipements.
- Maintenir la disponibilité opérationnelle des installations.
- Réaliser les opérations de maintenance dans le respect des contraintes budgétaires.
- Réduire les dépenses globales liées à la maintenance.
- Veiller à ce que les équipements restent dans un état satisfaisant tout au long de leur utilisation.
- Optimiser la disponibilité des installations à un coût raisonnable.
- Prévenir et corriger les pannes à tout moment.
- Allonger la durée de vie des équipements.
- Procéder au remplacement des équipements selon un calendrier défini.
- Garantir des performances techniques élevées des installations.
- Assurer un fonctionnement fiable, sécurisé et efficace. [9]

IV.5.Les Types de Maintenance: [9]

IV.5.1.Maintenance Corrective:

La Définition :

La maintenance corrective est l'ensemble des interventions réalisées après la survenue d'une panne, dans le but de rétablir un bien dans un état lui permettant d'assurer à nouveau sa fonction.

Les Avantages de la maintenance corrective :

- Réduction des coûts directs
- Budget de maintenance globalement modéré
- Moins de contraintes sur la gestion des stocks des pièces.

Les Inconvénients de la maintenance corrective :

Les durées d'arrêt et d'intervention peuvent être longues

Coûts indirects souvent élevés

Les pièces de rechange sont souvent coûteuses.

Les étapes de la maintenance corrective :

- **Détection** : Identifier, grâce à une surveillance continue, l'apparition ou la présence d'une défaillance.
- **Localisation** : Identifier précisément le composant ou les composants défaillants.
- **Diagnostic** : Déterminer la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement structuré fondé sur des inspections, des tests ou des contrôles.
- **Dépannage** : Remettre temporairement le bien en état de fonctionnement.

Remarque le dépannage peut parfois être une solution provisoire, avant une intervention définitive.

- **Réparation** : Intervention définitive visant à éliminer la défaillance détectée.

Remarque : Cette étape correspond au rétablissement durable du bon état de fonctionnement.

IV.5.2 La Maintenance Préventive:**La Définition :**

La maintenance préventive se définit comme une opération réalisée à des intervalles déterminés ou selon des critères prédéfinis, dans le but de réduire le risque de panne ou de dégradation du fonctionnement d'un équipement.

Les Différents Types De Maintenance Préventive :

- **Maintenance systématique** : Elle est effectuée selon un planning ou un calendrier établi à l'avance, basé sur la durée d'utilisation ou le nombre d'unités d'usage.
- **Maintenance conditionnelle** : Elle dépend de l'apparition d'indicateurs révélant l'état de l'équipement, permettant d'anticiper une éventuelle défaillance.

Avantages De La Maintenance Préventive :

Meilleure préparation des interventions

Réduction du temps de mobilisation des ressources humaines et matérielles

Planification et organisation des travaux facilitées.

Inconvénients De La Maintenance Préventive :

Coûts élevés liés à la gestion des stocks ;

- Charges supplémentaires en raison de la disponibilité et de la formation du personnel de maintenance

- Nécessité d'un budget conséquent pour la planification et les réparations anticipées.

L'Objectifs De La Maintenance Préventive :

- Prolonger la durée de vie des équipements
- Réduire la probabilité de pannes en cours d'exploitation
- Limiter les arrêts lors des révisions ou des défaillances
- Anticiper les besoins de maintenance corrective onéreuse
- Éviter les consommations excessives d'énergie ou de lubrifiant
- Améliorer les conditions de travail du personnel de production
- Réduire les coûts de maintenance globaux
- Éliminer les causes potentielles d'accidents graves.

Les Opérations De Maintenance Préventive :

- **Inspection** : Il s'agit d'une activité de surveillance régulière visant à détecter les anomalies et à effectuer des réglages simples. Elle ne requiert ni arrêt de l'équipement ni outils spécifiques, et n'interrompt pas le processus de production.
- **Contrôle** : Cette opération consiste à vérifier la conformité d'un équipement par rapport à des critères ou données préétablis, suivie d'une évaluation permettant de juger de son état.
- **Visite** : Elle désigne un examen approfondi, soit complet (visite générale), soit partiel (visite limitée), des différents composants d'un équipement. Réalisée selon une liste d'actions définies à l'avance, elle peut impliquer des démontages et entraîner l'immobilisation de la machine. Une visite peut également déboucher sur une maintenance corrective si des anomalies sont constatées.

IV.6. Les formes de la maintenance :

On distingue deux types de la maintenance :

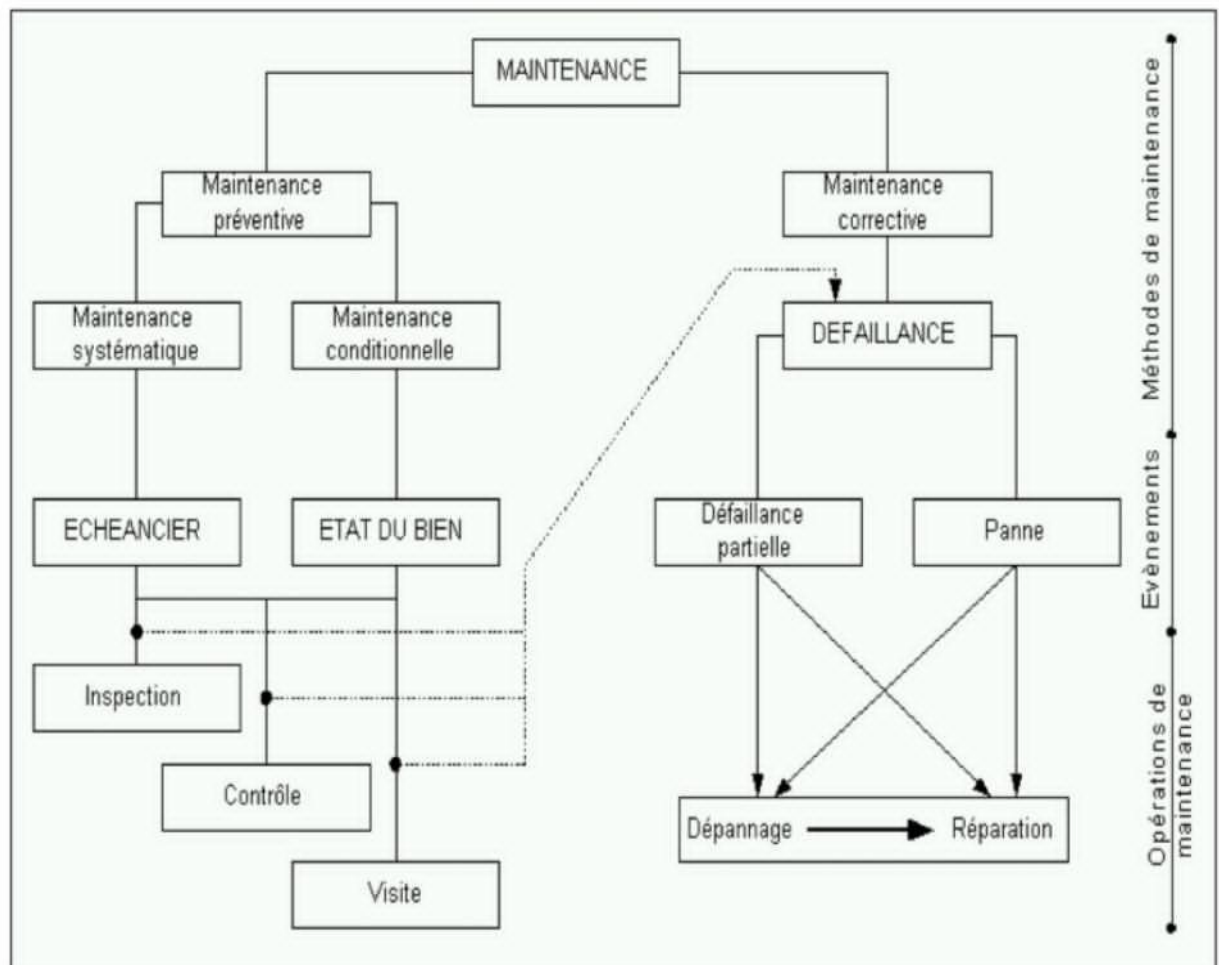


Figure. IV.1 : Les méthodes de maintenance [9]

IV.7. Les Fonctions d'un Service Maintenance : [9]

IV.7.1. Fonction Méthode :

Considérée comme le centre de réflexion du service maintenance, cette fonction définit :

- Ce qu'il faut faire, comment le faire, et avec quelles ressources humaines
- Les méthodes et techniques d'intervention
- Les moyens à mobiliser et les normes à respecter
- La création et l'exploitation de la documentation technique et historique ;
- L'élaboration des procédures d'entretien.

Elle détermine également les ressources (humaines et matérielles) nécessaires ainsi que la fréquence des interventions.

IV.7.2 .Fonction Ordonnancement:

Cette fonction assure l'organisation des interventions en :

- Suivant l'état d'avancement des travaux
- Établissant les plannings d'intervention
- Affectant le personnel selon les besoins et les délais
- Calculant le temps nécessaire pour chaque intervention.

IV.7.3.Fonction Exécution et Réalisation:

Cette fonction se charge de la mise en œuvre opérationnelle, notamment :

- La gestion des stocks, pièces de rechange, outils et instruments de contrôle
- L'installation des équipements (réception, vérification, mise en service) ;
- Le redémarrage des installations après intervention ;
- L'information du personnel sur l'utilisation des équipements ;
- La conduite des interventions de maintenance
- L'établissement du diagnostic en cas de panne.

IV.7.4. Fonction Documentation :

Le rôle documentaire soutient la gestion de la maintenance en facilitant :

- La planification de la maintenance préventive selon les paramètres d'usure
- La préparation du travail (rassemblement du matériel, des outils, et du personnel qualifié)
- L'optimisation du temps d'intervention
 - La gestion des stocks et des approvisionnements en pièces de rechange
- La formation du personnel.

a. Documentation Générale :

Elle se compose de :

- Une documentation relative aux techniques professionnelles, incluant les livres spécialisés, les revues, articles, conférences, etc.

- Une documentation sur les outils et les fournitures, comprenant les normes, les catalogues des équipements spécifiques et les pièces de rechange, entre autres.

b. Documentation Spécifique :

Elle inclut :

► Le Dossier Technique :

Ce dossier rassemble toutes les informations et documents liés à un type de machine donné.

Il fournit les données essentielles pour la préparation et l'exécution des interventions : il s'agit en quelque sorte de la carte d'identité de la machine.

► Le Dossier Historique :

Considéré comme le carnet de santé de la machine, ce dossier retrace son historique.

Il permet notamment d'évaluer les méthodes de maintenance utilisées.

IV.7.5.Fonction de Lancement:

Cette fonction consiste à organiser le travail selon un planning établi en fonction de la charge. Elle garantit également la gestion des équipes et leur bonne coordination afin d'assurer une exécution efficace des travaux. Elle veille aussi à la supervision et à l'orientation du personnel.

IV .7.6.Fonction de Gestion des Stocks:

Cette tâche vise à anticiper à tout moment les besoins de l'usine en termes de consommables de maintenance, de pièces de rechange spécifiques aux installations, et de produits liés à la production. Elle permet de définir les quantités à commander en fonction du niveau des stocks, des consommations et des délais de livraison.

IV.7.7. Fonction de Gestion des Coûts :

Le service de maintenance peut améliorer la rentabilité de l'entreprise en réduisant les coûts. Pour ce faire, il est essentiel de connaître précisément les dépenses liées à la maintenance afin de mieux les maîtriser.

IV.8. Maintenance appliquée sur la turbine à gaz 9FA :

La maintenance de routine d'une turbine à gaz est essentielle pour assurer sa fiabilité, sa performance et sa durée de vie. Elle comprend un ensemble de vérifications régulières, souvent planifiées selon le nombre d'heures de fonctionnement ou de cycles.

L'exploitant effectue une ronde de contrôle toutes les quatre heures sur l'ensemble des machines afin de vérifier l'absence de fuites (liquide, gaz), de bruits anormaux, de vibrations

du moteur, ou d'anomalies au niveau des vannes, etc. L'instrumentiste, le mécanicien et l'électricien assurent chacun la maintenance selon leur spécialité et leur rôle respectif."



Figure. IV.2: Vu de la turbine à gaz

IV.8.1. Vanne IBH (inlet blade heat):

Figure. IV.3: Vanne IBH après et avant la maintenance

IV.8.1.1. Inspection urgente et sécurisation immédiate :

- Mettre en sécurité la zone si l'unité est en fonctionnement.
- Inspecter avec caméra thermique pour détecter d'éventuelles fuites de chaleur ou points chauds.

IV.8.1.2. Diagnostic technique :

- Identifier le circuit exact concerné (l'air chaude.).

- Vérifier les températures nominales et comparer avec les lectures réelles.

IV.8.1.3. Intervention corrective :

- Remplacer l'isolation haute température (type fibre céramique ou laine minérale renforcée).
- Réhabiliter ou remplacer la coquille métallique de protection : en Inox 304 ou 316L si environnement corrosif.
- Appliquer revêtement thermique et anticorrosion sur les surfaces dégradées.

IV.8.1.4. Vérification des attaches et soudures :

- Réviser les charnières, verrous, brides, soudures. Une défaillance mécanique pourrait aggraver l'ouverture constatée.

IV.8.1.5. Risques spécifiques pour la turbine à gaz :

- Perte de rendement thermique si les flux ne sont pas correctement canalisés.
- Risque de dommage sur d'autres composants sensibles (câbles, capteurs, actionneurs).
- Risque incendie, en particulier si cette zone est proche de conduites d'huile, d'hydrogène ou d'air chaud.
- Conformité réglementaire : l'état observé pourrait violer les normes ISO/API sur les équipements de turbines à gaz.

IV.8.2. Vanne de l'eau entier incendie :





Figure. IV.4 : Vanne de l'eau entier incendie après et avant la maintenance

IV.8.2.1. Constat visuel :

Fuite importante :

- Présence évidente de dépôts verts et humides (probablement algues ou moisissures) au niveau du presse-étoupe, du corps de vanne et de la bride inférieure.
- Cela signale une fuite lente mais continue d'eau, favorisant la croissance biologique.

IV.8.2.2. Corrosion potentielle :

- L'humidité prolongée pourrait provoquer une corrosion interne du mécanisme de la vanne, voire une attaque des boulons.
- Le joint de bride est probablement défectueux.
- 3. Manque d'entretien : • Aucun nettoyage ni inspection récente visible.
- Le volant semble encore fonctionnel, mais l'axe peut être grippé à cause de l'humidité.

IV.8.2.3. Recommandations de maintenance (préventive et corrective) :

1. Intervention immédiate :

- Isoler la ligne et dépressuriser le réseau si possible.
- Nettoyer les dépôts (brosse métallique douce, jet d'eau ou détergent biodégradable).
- Vérifier la présence d'eau résiduelle sous pression.

2. Inspection et réparation :

- Démonter partiellement le presse-étoupe pour inspection.

- Vérifier l'état du joint d'étanchéité de la tige et des joints de bride.
- Garniture de presse-étoupe
- Joint de bride • Boulons si corrodés

3. Traitement et prévention :

- Appliquer un revêtement anticorrosion ou peinture adaptée sur la zone nettoyée.
- Appliquer une graisse hydrofuge au niveau de la tige de commande.

4. Contrôle fonctionnel :

- Vérifier que la vanne s'ouvre/ferme correctement.
- Test hydraulique pour s'assurer qu'il n'y a plus de fuite.

IV.8.2.4. Risque spécifique dans une turbine à gaz :

- En cas d'incendie, perte d'intégrité du système incendie = danger majeur pour les équipements critiques (compresseur, chambre de combustion, lignes d'huile ou hydrogène).
- Le non-fonctionnement de cette vanne pourrait empêcher l'alimentation en eau des réseaux de protection (sprinklers, monitors, etc.).
- Risque de contamination biologique dans le réseau si l'eau stagne.

IV.8.3. Pompe de l'eau :

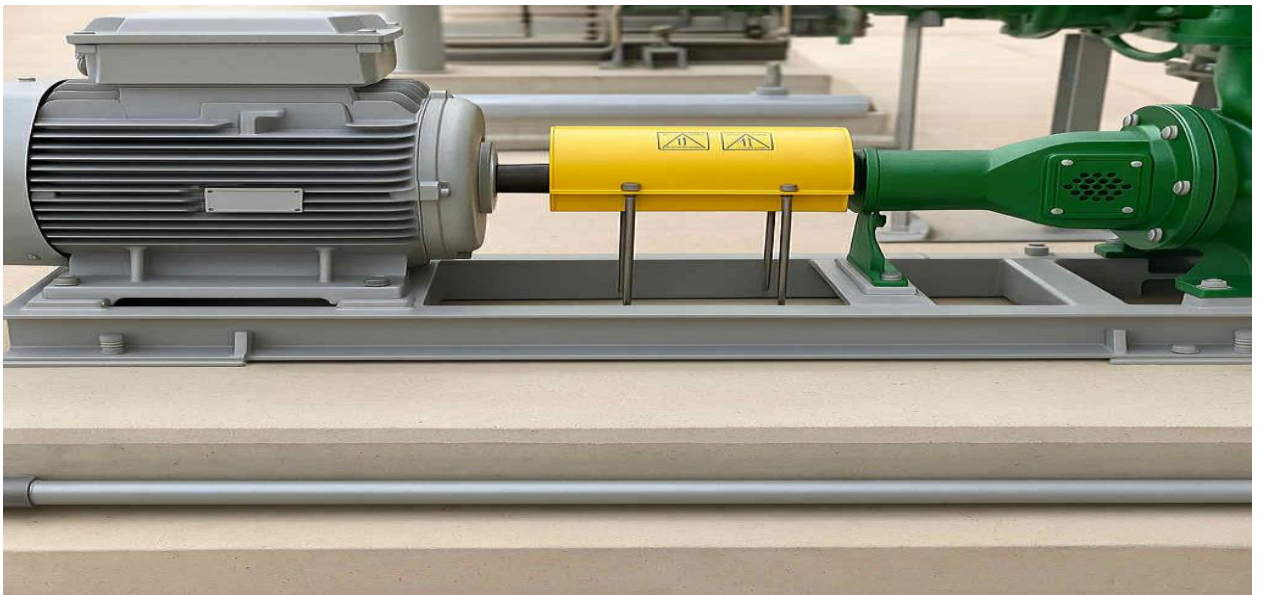


Figure. IV.5 : Pompe de l'eau après et avant la maintenance

IV.8.3.1. Nettoyage et inspection visuelle :

- Nettoyage complet de la grille d'aspiration et des éléments internes.
- Inspection des pales de la roue pour détecter l'usure ou les dépôts.

IV.8.3.2. Maintenance mécanique :

- Vérification de l'alignement arbre moteur/arbre pompe avec comparateur.
- Contrôle des roulements (jeu, bruit, température).
- Vérification de l'étanchéité au niveau de la garniture ou du presse-étoupe.

IV.8.3.3. Prévention de la corrosion :

- Brossage des parties oxydées et application d'un revêtement antirouille.
- Si la pompe fonctionne avec eau adoucie ou traitée, vérifier le pH et l'inhibiteur de corrosion.

IV.8.3.4. Repose et serrage :

- Remontage du couvercle de pompe avec joint neuf si nécessaire.
- Serrage au couple recommandé.
- Test de rotation manuelle avant mise sous tension.

IV.8.3.5. Essai de fonctionnement :

- Démarrage à vide → puis en charge.
- Contrôle du débit, pression, bruit, vibration.

IV.8.3.6. Importance dans le système de la turbine à gaz :

- Une défaillance de cette pompe peut entraîner une surchauffe critique des composants internes de la turbine (huile, air, etc.).
- Cela peut provoquer une très forte dégradation des performances thermiques ou une mise en sécurité d'urgence.

IV.8.4. Lavage de compresseur :

Le lavage du compresseur dans une turbine à gaz est une procédure de maintenance cruciale qui vise à éliminer les dépôts et la contamination qui peuvent réduire l'efficacité de la turbine.

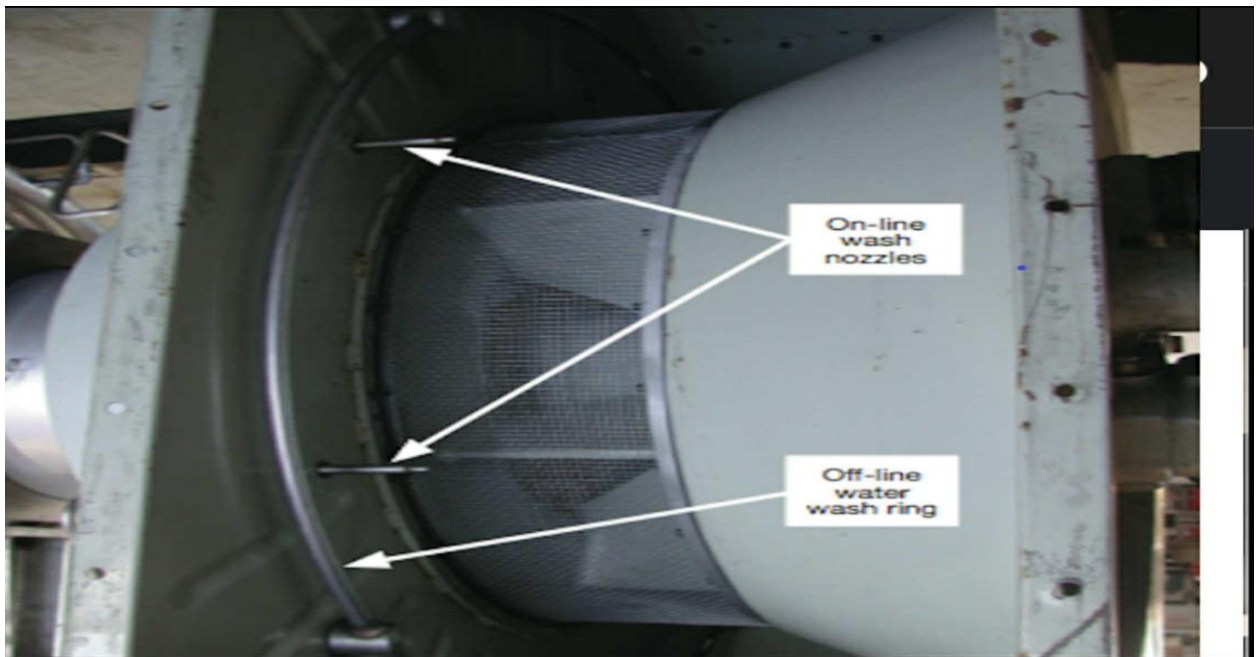


Figure. IV.6: Lavage du compresseur

IV.8.4.1. L'importance de lavage du compresseur :

Les dépôts, souvent causés par la poussière, la saleté ou les produits de combustion, réduisent le rendement du compresseur, ce qui entraîne une baisse de puissance et une augmentation de la consommation de carburant.

Les dépôts, souvent causés par la poussière, la saleté ou les produits de combustion, réduisent le rendement du compresseur, ce qui entraîne une baisse de puissance et une augmentation de la consommation de carburant.

IV.8.4.2. Les méthodes de lavage:

Il existe deux méthodes principales : le lavage hors ligne (à froid) et le lavage en ligne (à chaud), avec des options supplémentaires comme le lavage au ralenti.

Lavage hors ligne (à froid) : La turbine est arrêtée et refroidie avant le lavage. Cette méthode permet un nettoyage plus approfondi et est souvent utilisée pour les nettoyages périodiques ou en cas de contamination sévère.

Lavage en ligne (à chaud) : Le lavage est effectué pendant que la turbine fonctionne. Cette méthode est plus rapide et peut être utilisée pour un nettoyage préventif régulier.

IV.8.5. Coswin :

Coswin est un logiciel de GMAO (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur) développé par l'entreprise française Siveco Group. Ce logiciel est largement utilisé dans plusieurs secteurs industriels, notamment l'énergie, les transports, l'eau, et bien sûr, chez

Sonelgaz, l'entreprise publique algérienne spécialisée dans la production, le transport et la distribution d'électricité et de gaz. [5]

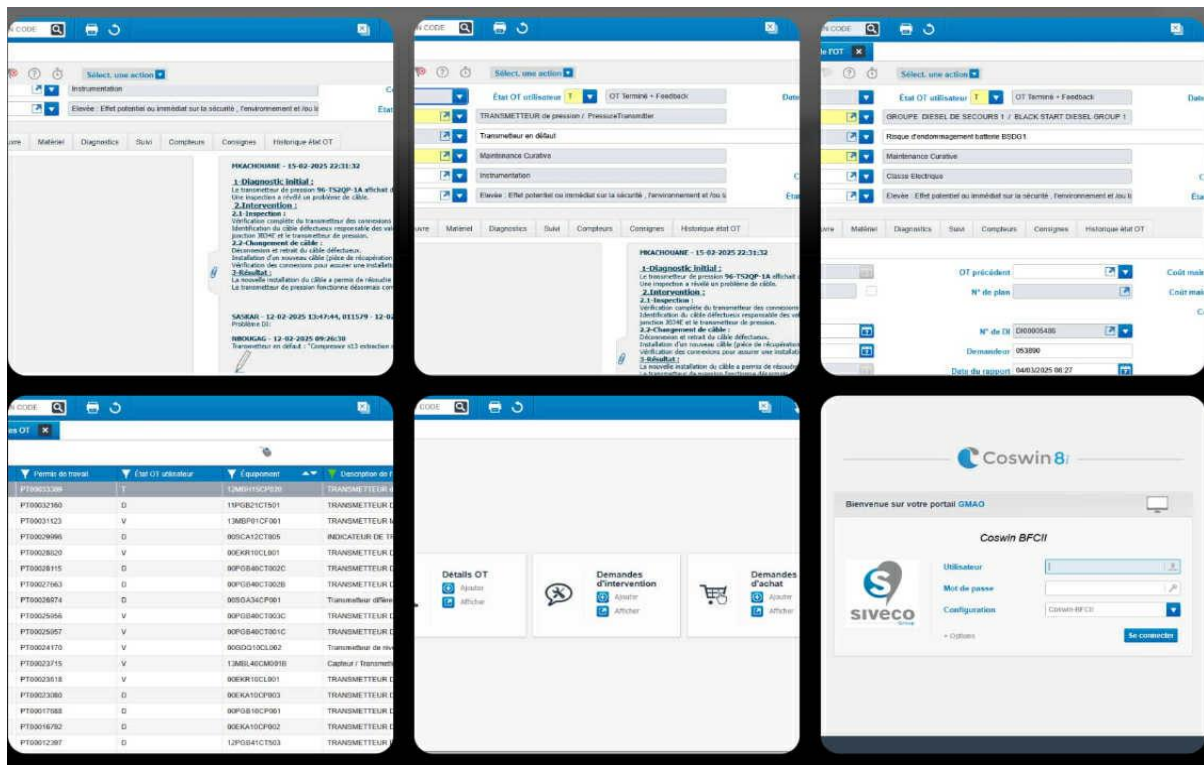


Figure. IV.7: La gestion de la maintenance par logiciel coswin

IV.8.5.1. Objectif principal de Coswin chez Sonelgaz :

Optimiser la gestion des opérations de maintenance des installations industrielles (centrales électriques, réseaux de gaz, postes de transformation, etc.) pour :

- améliorer la disponibilité des équipements
- réduire les temps d'arrêt non planifiés,
- garantir la sécurité et la traçabilité des interventions,
- maîtriser les coûts de maintenance.

IV.8.5.2. Fonctionnalités principales de Coswin

- Gestion des équipements
- Maintenance préventive et corrective
- Gestion des interventions
- Gestion des stocks et des pièces de rechange

- Indicateurs et tableaux de bord (KPI).

IV.8.5.3. Cas d'utilisation chez Sonelgaz :

Chez Sonelgaz, Coswin est utilisé dans :

- Les centrales thermiques pour suivre les maintenances sur les turbines à gaz, chaudières, alternateurs, systèmes auxiliaires...
- Les réseaux de distribution pour gérer les interventions sur les transformateurs, postes HT/MT, vannes de gaz...
- Les équipes de terrain, qui peuvent utiliser Coswin via tablette ou ordinateur portable pour consulter les OT, valider une opération ou déclarer une panne en direct.

IV.8.5.4. Avantages pour Sonelgaz :

- Standardisation de la gestion de maintenance à l'échelle nationale.
- Optimisation des coûts grâce à une meilleure planification.
- Réduction du risque de pannes majeures.
- Aide à la transition numérique du secteur énergétique.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur des concepts de base de la maintenance et la maintenance appliquée sur la turbine à gaz 9FA avec quelques exemples de maintenance.

Conclusion Générale :

À travers ce travail, nous avons pu approfondir nos connaissances sur le fonctionnement des turbines à gaz, leur comportement en conditions réelles et les différentes contraintes liées à leur exploitation. L'analyse menée a permis de mettre en évidence plusieurs éléments clés, notamment l'influence des conditions climatiques sur les performances de la turbine, ainsi que l'importance d'un bon suivi thermodynamique pour optimiser la production.

L'étude a porté sur la turbine à gaz de l'unité Sonelgaz de Boufarik de puissance $3 \times 235 \text{ MW}$ et sa maintenance :

- Après la présentation de la centrale et les différentes turbines à gaz, une étude énergétique a été faite, les performances d'une turbine à gaz de 235 MW sont également calculées et comparées à ceux du constructeur américain (general electric company)
- L'écart des résultats obtenus est dû principalement à ce que le constructeur utilisait la turbine à pleine charge quant à la centrale la charge est réduite et les puissances obtenues de 266.9 MW (octobre 2024) et 180 MW (juin 2024) le prouvent avec les conditions normales du site.
- L'utilisateur de la centrale a validé ces résultats et les trouvait normales
- La durée de vie de la centrale est conditionnée par la maintenance des différentes turbines et leurs annexes
- La maintenance est un domaine très pratique dans la vie industrielle, c'est elle qui assure la pérennité de la machine ; elle a ses règles que l'agent de maintenance doit les appliquer
- On distingue généralement trois types de maintenance préventive, palliative et conditionnelle
- Elles sont généralement appliquées On recommande que cette étude doit être reprise en axant sur la maintenance détaillée des différents constituants de la centrale toute entière

Références bibliographiques :

- [1] BOUCHEBOUT SAID et DEFFAS CHEMSEDDINE, Thème : analyse 4 E (énergie- exergie - économique- environnementale) d'une centrale turbine à gaz, option : énergétique, université seddik benyahia de Jijel, Promotion : 2018/2019
- [2] TAMIMOUNT AMINE, Thème : Effet de la variation des paramètres économiques sur la rentabilité des turbines à gaz et des cycles combinés, Spécialité : Conversion d'énergie, Master en génie mécanique, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES, Promotion : 2016/2017
- [3] METALLAOUI NASSIM, Thème : étude thermodynamique de la turbine à gaz MS7001EA au niveau du complexe GNL1K de Skikda, Spécialité : Energétique et environnement, Domaine : sciences et technologie, Filière : Génie mécanique, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, Année : 2016/2017
- [4] BEY SAID et YAZAG SAMIR, Thème : AMELLORATION DES PERFORMANCES D'UNE TURBINE A GAZ M. S5002C PAR PRECHAUFFAGE, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, Promotion : 2016/2017
- [5] Documentation de la centrale Boufarik 2(Sonelgaz).
- [6] BEN AMOR, Y. REZIG, T., "Calcul énergétique d'une turbine à gaz, mémoire d'ingénieur (Université Mohamed Khider – Biskra, 2010.
- [7] Turbine à gaz à cycle combiné, URL : [Www. Wikipédia.com](http://Www.Wikipédia.com)
- [8] Tahir Raof, Dehouche Abdelaziz. Commande en puissance d'un central hydroélectrique. Mémoire de fin d'études, Université de Bejaïa, 2015.
- [9] HARRID Nedjm, MOSTEFAOUI Abdel Azi Etude De La Maintenance D'une Turbine A Gaz MS 5001Mémoire de fin d'études, Université Ibn Khaldoun de Tiaret 2015/2016.