

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**U. M. M. Tizi-Ouzou
Faculté de génie de la construction
Département de génie mécanique**

**En vue de l'obtention du diplôme de master en génie mécanique
Option Energétique**

THEME



**Détermination des performances de la
turbine a gaz en utilisant
un fluide réel de fonctionnement**

Encadreur : Mr.HAMZAOUI

Présenté par :
Mr. BABACI Bilal
Mr. BEN OUFELLA Sofiane

2018/2019

Remerciements

On dédie ce modeste travail à nos familles respectives en les remerciant infiniment ainsi on remercie tous ceux qui ont contribué et nous ont encadré et dirigé afin d'accomplir et de finaliser ce projet de fin d'étude sans oublier les jurés et les personnes présentes dans cette salle. Merci à tous.

Nomenclature :

<u>Variable :</u>	<u>Désignation :</u>	<u>Unité :</u>
C_p	Chaleur spécifique moyenne à pression constante	[kJ/kmol.K]
C_v	Chaleur spécifique moyenne à volume constant	[kJ/kmol.K]
m	Masse	[Kg]
v	Vitesse	[m/s]
P	Pression	[bar]
H	Enthalpie massique	[kJ/kg]
S	Entropie	[kJ/kg.k]
\dot{m}	Débit massique	[kg/s]
g	Gravité terrestre	[m/s ⁻²]
Q	Energie échangée	[kJ/kg]
T	Température	[K, °C]
Cs	Consommation spécifique	[-]
\dot{W}	Puissance	[MW]
\dot{W}_{net}	Puissance net de la machine	[KW/h]
\dot{W}_c	Puissance du compresseur	[MW]
\dot{W}_t	Puissance de la turbine	[MW]
W	Travail	[KJ/Kg]
W_c	Travail du compresseur	[KJ/Kg]
W_t	Travail de la turbine	[KJ/Kg]
Hr	Humidité relative	[%]
Dm	Débit massique	[kg/s]
\dot{m}_f	Débit massique du fuel	[kg/s]
\dot{m}_a	Débit massique de l'air	[kg/s]
PCI	Pouvoir calorifique inferieur	[kJ/kg]
PCS	Pouvoir calorifique supérieur	[kJ/kg]
N	Vitesse de rotation	[tr/min]
Q_v	Débit volumique	[m ³ /s]
z	Altitude au niveau de la mer	[m]
\dot{E}_x ou X_h	Exergie	[kJ]
\dot{E}_{x_t}	Exergie totale	[kJ]
$\dot{E}_{x_{ph}}$	Exergie physique	[kJ]

$\dot{E}x_{cin}$	Exergie cinétique	[kJ]
$\dot{E}x_{po}$	Exergie potentiel	[kJ]
$\dot{E}x_{ch}$	Exergie chimique	[kJ]
$\dot{E}x_d$	Exergie détruite	[kJ]

Abréviation :

TAG	Turbine à gaz.
ISO	Organisation standard international.
IDE	Environnement de développement intégré.
IGV	Aubes à géométries variables.
TSC	Contrôleur de température de sortie corrigé.
TAG	Turbine à gaz.
PCI	Pouvoir calorifique inférieur.
GNL	Gaz naturel liquéfié.
SC	Station compression.
CC	Chambre de combustion
UFC	Unité de fractionnement des condensats.
ADE	Aubes directrice d'entrée.
ADS	Aubes directrices de sortie.
GG	Générateur de gaz.
THP	Turbine haute pression.
TBP	Turbine haute pression.
GVRC	Générateur de Chaleur a Récupération de Chaleur.
CCC	Centrale à cycle combiné.
Amb	Ambiant.
Opt	Optimal.
Atm	Atmosphère.

Abréviation en anglais :

GT	Gaz turbine.
IP	Intermédiaire pression.
LP	Low pression.
ST	Steam turbine.
HSRG	Heat Recuperation Surchaufeur Generator.

Variable grecque:

η	Rendement	[%]
η_c	Rendement du compresseur	[%]
η_t	Rendement de la turbine	[%]
η_{cc}	Rendement de la chambre de combustion	[%]
λ	Coefficient d'excès d'air	[-]
τ	Taux de compression	[-]
μ	Masse molaire	[kg/k mol]
γ	Rapport des chaleurs spécifiques ($\frac{c_p}{c_v}$)	[-]
r	rapport des températures	[-]
μ	Masse molaire	[kg/k mol]
ρ	Masse volumique	[kg/m ³]

Indices

FAR	Rapport (air/fuel)
R	Rapport (travail compresseur/travail turbine)
a	Air
e	Entrée
s	Sortie
hp	Haut pression
bp	Basse pression
f	Rapport des débits air de combustion /air de compression
c	Relative au compresseur
t	Relative à la turbine
cc	Relative à la chambre de combustion
Is	Isentropique
1, 2, 3, 4, 5	Positions du cycle présentées par les différents éléments de la turbine à gaz.
c_x	Chaleur spécifique correspondante au processus de la transformation thermodynamique.
en	Entrée.
sort	Sortie.
sys	Système.
gen	Générée.

Sommaire :

Introduction général.....	1
<i>CHAPITRE 1 : Central de Ras Djinet à cycle combiné.....</i>	<i>2</i>
Introduction :.....	3
Emplacement de la centrale :.....	3
1.2Description générale de l'usine :.....	3
<i>CHAPITRE 2 : Détail et composition de la turbine à gaz.....</i>	<i>8</i>
Introduction :.....	9
2.1. Historique :.....	9
2.1.1. L'initial de la turbine à gaz :.....	9
2.1.2 L'application de la turbine à gaz dans l'industrie de production électrique :.....	9
2.2Turbineà gaz STG5-4000F :.....	10
2.3 Les Composants de base de la turbine à gaz :.....	14
2.3.1Compresseur d'air multi-étage :.....	15
2.3.2. Les principaux composants du compresseur d'air multi-étages :.....	16
2.3.3 Chambres de combustion :.....	18
2.3.4 Turbine axiale multi-étage :.....	20
2.3.5. Les principaux composants de la turbine axiale multi-étage :.....	20
2.4 Mise en marche de la turbine à gaz :.....	27
2.5 Système d'échappement avec silencieux :.....	28
2.5.1 Fonction du système d'échappement :.....	28
2.5.2 Les principaux paramètres du système d'échappement [1]:.....	29
2.6. Système de refroidissement par air et système d'étanchéité :.....	30
2.6.1Système de refroidissement par air de la turbine :.....	30
Conclusion :.....	33
<i>CHAPITRE 3 : Analyse énergétique et exergétique de la Turbine à gaz.</i>	<i>34</i>
Introduction :.....	35
3.1 Notions et rappels thermodynamiques :.....	35
3.1.1 Rappel fondamental de la Thermodynamique :.....	35
3.1.2Quantités et fonctions d'état thermodynamiques :.....	35
3.2 Notion d'énergie ainsi différents bilans:[3].....	39
3.3Différents bilans thermodynamique :.....	39
3.3.1 Bilan massique :.....	39

3.3.2 Bilan énergétique :	39
3.3.3 Bilan entropique :	40
3.4 Notion d'exergie et étude:	40
3.4.1 Définition : [3]	40
3.4.2 Bilan exergétiques d'un système : [3]	42
3.5 Analyse exergétique réelle du cycle :	43
3.6 Étude du cycle réel pour un fonctionnement de la Turbine à gaz de type STG 5-4000F de RAS DJINET :	44
3.6.1 Données recueillis : [1]	44
3.6.2 Procédure de calcul :	46
3.6.3 Etude paramétrique à l'aide de MATLAB et NST- REFPROP :	60
Conclusion :	64
Conclusion Général :	65

Liste des tableaux :

Tableau 1: Le premier brevet relatif d'une turbine à gaz.	11
Tableau 2 : Composants de base de la turbine à gaz: Composants de base de la turbine à gaz.	15
Tableau 3 : Composants de la chambre de combustion.....	19
Tableau 4: Aubes de la turbine.	21
Tableau 5: Composition chimique et exergie molaires.	44
Tableau 6 : Autres données du site. [1]	45
Tableau 7 : Composition du gaz naturel avec différentes caractéristique. [1].....	50
Tableau 8: Fractions molaires des produits dû à la combustion.	51
Tableau 9 : Enthalpies des produits dû à la combustion.....	51

Liste des figures :

Figure 1: Vue dessus de la nouvelle centrale thermique [1].....	3
Figure 2 : Turbine à gaz/générateur/ turbine à vapeur.[1]	4
Figure 3: Chaudière de récupération.[1].....	5
Figure 4 : Système d'aspiration d'eau de mer.[1].....	6
Figure 5 : Réservoir de stockage gasoil.[1]	7
Figure 6 : Le premier brevet relatif d'une turbine à gaz.[2]	9
Figure 7 : Cycle de turbine à gaz en mode cycle combiné (Disposition mono-arbre).[1].....	12
Figure 8: Différents cycles (Brayton, Rankine).[2]	13
Figure 9 : Les Composants de base de la turbine à gaz. [1]	14
Figure 10 : Compresseur d'air multi-étage. [1]	16
Figure 11: Composants de la chambre de combustion. [1]	19
Figure 12 : Aubes de la turbine. [1].....	21
Figure 13 : Ailettes de la turbine. [1].....	23
Figure 14 : Boîtier de la turbine. [1].....	24
Figure 15 : Turbine axial multi-étage. [1]	25
Figure 16 : Turbine axial multi-étage. [1]	26
Figure 17 : Diffuseur de gaz d'échappement. [1].....	27
Figure 18 : Transformation 1-2 sur le diagramme P-V (de Clapeyron). [2].....	37
Figure 19 : système énergétique	39

Figure 20 : Masse volumique d'air d'admission en fonction de T. ambiante.	47
Figure 21 : Débit d'air d'admission en fonction de la T. ambiante.	48
Figure 22 : Débit d'air d'admission en fonction de masse volumique de ce fluide.	49
Figure 23 : Consommation spécifique en fonction de la température ambiante.....	52
Figure 24 : Puissance nette en fonction de la température ambiante.....	55
Figure 25 : Puissance nette en fonction de température à l'entrée turbine.	56
Figure 26 : Puissance nette en fonction du taux de compression.	57
Figure 27 : Rapport (W_c/W_t) en fonction de la température ambiante.....	58
Figure 28 : Rapport (W_c/W_t) en du taux de compression.	59
Figure 29 : Rapport (W_c/W_t) en fonction de la température à l'entrée turbine.....	59
Figure 30 : Rendement Global en fonction de la température ambiante	60
Figure 31 : Rendement Global en fonction la température ambiante.	61
Figure 32 : Rendement Global en fonction du taux de compression	62
Figure 33 : Rendement Global en fonction du taux de compression	62
Figure 34 : Rendement Global en fonction de la température à l'entrée turbine.....	63
Figure 35 : Rendement Global en fonction de la température à l'entrée turbine.....	64

1- C'est quoi MATLAB ?

Matlab est un logiciel de calcul numérique commercialisé par la société MathWorks1. Il a été initialement développé à la fin des années 70 par Cleve Moler, professeur de mathématique à l'université du Nouveau-Mexique puis à Stanford, pour permettre aux étudiants de travailler à partir d'un outil de programmation de haut niveau et sans apprendre le Fortran ou le C.

Matlab signifie Matrix Laboratory. Il est un langage pour le calcul scientifique, l'analyse de données, leur visualisation, le développement d'algorithmes. Son interface propose, d'une part, une fenêtre interactive type console pour l'exécution de commandes, et d'autre part, un environnement de développement intégré (IDE) pour la programmation d'applications.

Matlab trouve ses applications dans de nombreuses disciplines. Il constitue un outil numérique puissant pour la modélisation de systèmes physiques, la simulation de modèles mathématiques, la conception et la validation (tests en simulation et expérimentation) d'applications. Le logiciel de base peut être complété par de multiples toolboxes, c'est-à-dire des boîtes à outils. Celles-ci sont des bibliothèques de fonctions dédiées à des domaines particuliers. Nous pouvons citer par exemple : l'Automatique, le traitement du signal, l'analyse statistique, l'optimisation...

2- L'utilité de NST-REFPROP ?

A partir de ce logiciel informatique on peut retirer les caractéristiques d'un fluide (pression, température, enthalpie, entropie) en un point très précis.

Introduction général

La turbine à gaz est une machine thermique, l'idée de sa fabrication remonte au 18ème siècle. Elle transforme l'énergie thermique en énergie mécanique pour des fins bien précis et dans différents domaines : domaine pétrolier, production électrique...etc. Dans notre travail cette dernière est utilisée pour produire de l'électricité dans un cycle combiné.

Par ailleurs, on a effectué un stage pratique au niveau de la centrale thermoélectrique de Ras Djinet fonctionnant avec cycle combiné.

Notre travail inclut trois chapitres qui sont :

Le chapitre 1 traite l'emplacement géographique et décrit les différents composants de cette centrale.

Le chapitre 2 montre et explique les trois parties essentielles de la turbine à gaz qui sont : compresseur, chambre de combustion, turbine de détente. Avec leurs constructions et compositions ajoutant à cela le système de refroidissement de la turbine de détente ainsi sa mise en marche.

Le chapitre 3 présente les données requises du site concernant la turbine à gaz, des formules mathématiques, ainsi on a exposé les résultats calculés à partir des logiciels informatiques sous forme de tableaux et de figures numérotés.

Dans ce contexte pour résoudre la problématique on fait appel à un couplage de logiciels informatiques NST-REFPROP et MATLAB en utilisant des gaz réels de fonctionnement.

Enfin, l'objectif de ce projet est de déterminer les performances de cette Turbine à gaz en utilisant des gaz réels et de voir l'évolution des paramètres tels que le rendement globale en variant la température ambiante, le taux de compression et la température à l'entrée turbine.

CHAPITRE 1 : Central de Ras Djinet à cycle combiné

Introduction :

Dans ce chapitre on va décrire le nouveau site de RAS DJINAT en cours de construction, et on parlera aussi de son emplacement géographique ainsi que les détails sur sa composition, ce site qui a pour but de produire de l'électricité et de renforcer la région centre de pays en cette énergie.

Emplacement de la centrale :

La nouvelle centrale thermique à système combiné est située à la commune de RAS DJINET au bord de la mer dans la Wilaya de BOUMERDES. La multinationale coréenne DAWOO construit la centrale.

Elle alimentera la région centre du pays et renforcera sa capacité d'alimentation en énergie électrique via trois sous stations (AKBOU, EL AFFROUN, SI MUSTPHA). Elle est composée de trois groupes, dont chacun délivre approximativement une puissance de 400 MW. Avec un totale de 1131.1 MW.



Figure 1: vue dessus de la nouvelle centrale thermique [1]

1.2 Description générale de l'usine :

Cette partie couvre la « Description de la centrale à cycle combiné RAS-DJINET, les principaux composants et leurs dispositions».

Le compresseur des turbines à gaz aspire l'air ambiant à travers un filtre à air d'admission, le comprime et l'alimente au système de combustion. Le gaz combustible est

CHAPITRE 1 : Central de Ras Djinat à cycle combiné

introduit dans le système de combustion et est brûlé avec de l'air comprimé. Le gaz de combustion chaud qui en résulte s'écoule dans la turbine de détente. Le gaz se dilate et entraîne la turbine à gaz. La puissance mécanique générée dans la turbine entraîne l'alternateur et le compresseur. La sortie du générateur est connectée par un transformateur élévateur de générateur et des barres omnibus au réseau. [1]

Le gaz combustible est chauffé dans un réchauffeur de bain-marie au moyen d'un contrôleur de température local pour maintenir au-dessus de la température du point de rosée. Le gaz combustible est finalement préchauffé par le réchauffeur d'efficacité par l'alimentation en eau fournie par l'économiseur du générateur de vapeur à récupération de chaleur de la pression intermédiaire. L'eau d'alimentation quittant le préchauffeur de gaz combustible est mélangée avec le flux de condensat avant d'entrer dans le préchauffeur de condensat. [1]

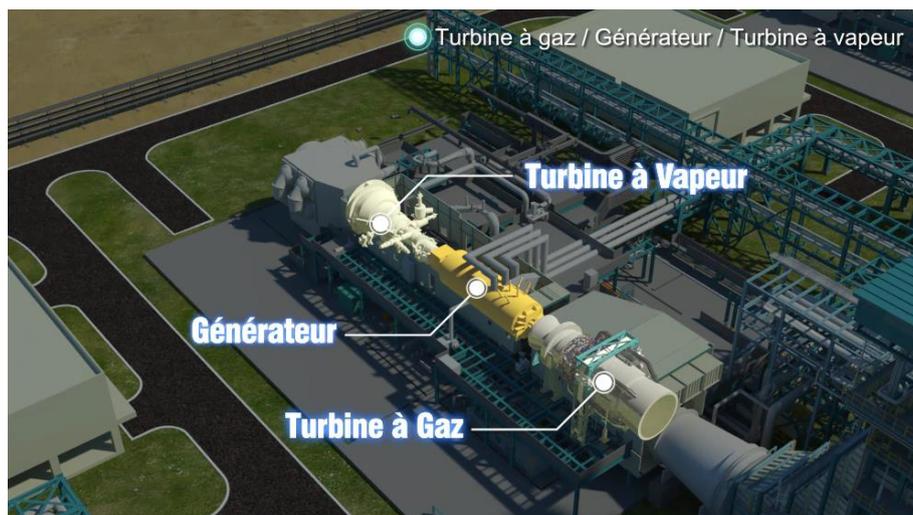


Figure 2 : turbine à gaz/générateur/ turbine à vapeur [1]

Le gaz de combustion qui sort de la turbine à gaz est à haute température et transporte beaucoup d'énergie thermique. Cette énergie thermique d'échappement est utilisée pour produire de la vapeur dans le générateur de vapeur à récupération de chaleur horizontal à triple pression (basse pression, pression intermédiaire, haute pression). [1]

La vapeur générée est alimentée à différentes étapes de la turbine à vapeur (haute pression, pression intermédiaire, basse pression).

CHAPITRE 1 : Central de Ras Djinat à cycle combiné

La vapeur d'échappement de turbine basse pression, la vapeur d'étanchéité, les drains de turbine et la vapeur de dérivation (haute pression/basse pression) sont condensés dans un condenseur à surface de vapeur. L'eau d'appoint est également apportée dans la cheminée du condenseur. Le condensat de la cheminée est évacué par des pompes d'extraction de condensat vers le système de préchauffage des condensats (économiseur basse pression) via les échangeurs et refroidisseurs de l'éjecteur d'air à vapeur et du condensateur de vapeur du presse-étoupes. Le dégazeur est intégré au ballon de vapeur à basse pression. [1]



Figure 3: chaudière de récupération. [1]

Les pompes d'alimentation générateur de vapeur a récupération de chaleur doivent aspirer depuis le ballon de vapeur basse pression et fournir l'eau d'alimentation au circuit haute pression et par une purge intermédiaire, au circuit de pression intermédiaire. [1]

La vapeur du tambour à vapeur haute pression circule à travers le surchauffeur et va vers la turbine à vapeur haute pression. La vapeur prélevée de la décharge de la turbine a vapeur haute pression retourne au générateur de vapeur a récupération de chaleur, où elle est mélangée avec la vapeur surchauffée a pression intermédiaire puis en passant par le réchauffeur retournera à la turbine à vapeur a pression intermédiaire. [1]

Enfin, la vapeur prélevée de la décharge de la turbine à vapeur a pression intermédiaire va directement à la turbine à vapeur à basse pression, cette vapeur provenant du générateur de

CHAPITRE 1 : Central de Ras Djinat à cycle combiné

vapeur a récupération de chaleur est admise dans la décharge de la turbine à vapeur a pression intermédiaire ou dans la transition. La vapeur déchargée de la turbine a vapeur a basse pression est envoyée au condenseur de surface de vapeur. [1]

L'eau de mer est amenée à l'intérieur de l'usine à travers quatre tuyaux d'admission de diamètre 2 300mm. Le tuyau d'admission est relié à un puisard d'admission d'eau de mer commun après vient le filtrage d'eau des déchets, son dessalement et déminéralisation afin qu'il soit près à l'utilisation. [1]



Figure 4 : Système d'aspiration d'eau de mer.[1]

Les pompes d'alimentation de l'usine de dessalement transfèrent l'eau brute à l'usine de dessalement. L'eau dessalée doit être stockée dans des réservoirs de stockage d'eau dessalée et doit être transférée vers divers consommateurs (eau potable, eau de service, alimentation d'usine etc.) par l'intermédiaire de systèmes de pompage respectifs. [1]

L'usine de déminéralisation produit l'eau déminéralisée à partir de l'eau dessalée en utilisant des échangeurs d'ions à lit mélangé qui seront ensuite stockés dans des réservoirs de stockage d'eau déminéralisé et transférés vers divers consommateurs. [1]

La pompe à eau de circulation permettrait de pomper l'eau de mer vers le condenseur. Après avoir extrait la chaleur du condenseur, trois collecteurs indépendants sont amenés du condenseur de chaque unité et connectés à un bassin de siphon unitaire. Depuis le bassin du siphon, l'eau est envoyée à la mer par un canal unitaire. [1]

CHAPITRE 1 : Central de Ras Djinat à cycle combiné

Le système d'alimentation et de conditionnement de gaz combustible (gaz naturel) fournit du gaz naturel à un certain niveau de propreté, de pression et de température pour répondre aux critères de fonctionnement et de conception du principal utilisateur de gaz naturel (Turbine à gaz). Ce processus est nécessaire pour s'assurer que les aérosols, la condensation d'eau libre et les particules solides ne seront pas présents dans les systèmes de transmission ou de distribution de gaz aux principaux utilisateurs. [1]

Pour le combustible de réserve (gasoil/fuel) qui est utilisé en cas de rupture du gaz naturel est reçu via des camions citernes et stocké dans des réservoirs puis livré à chaque turbine à gaz au moyen des pompes d'acheminement de combustible. [1]



Figure 5 : Réservoir de stockage gasoil. [1]

***CHAPITRE 2 : Détail et
composition de la turbine à
gaz***

Introduction :

Le début de ce deuxième chapitre abordera le sujet de turbine à gaz en général (histoire, initiative ainsi que son application dans la vie quotidienne). Puis on se concentrera sur tous les détails de la turbine à gaz type (SGT5-4000F) siemens qui est utilisée dans ce site de production de l'électricité.

2.1. Historique :

2.1.1. L'initial de la turbine à gaz :

L'idée d'une turbine à gaz à combustion interne, ou d'une turbine à air chaud, est assez ancienne. Dès 1731, l'Anglais John Barber déposa un brevet sur ce sujet. Cependant, il fallut attendre environ cent ans avant que la turbine à gaz ne prenne son essor. Son développement fut longtemps retardé par le succès de la turbine à vapeur (turbine à action de Gustave Laval en 1883 et turbine à réaction de Charles Parsons en 1884). L'intérêt pour la turbine à gaz conduisit à une activité fiévreuse de dépôts de brevets entre 1880 et 1900 et à de nombreuses expériences entre 1900 et 1910.

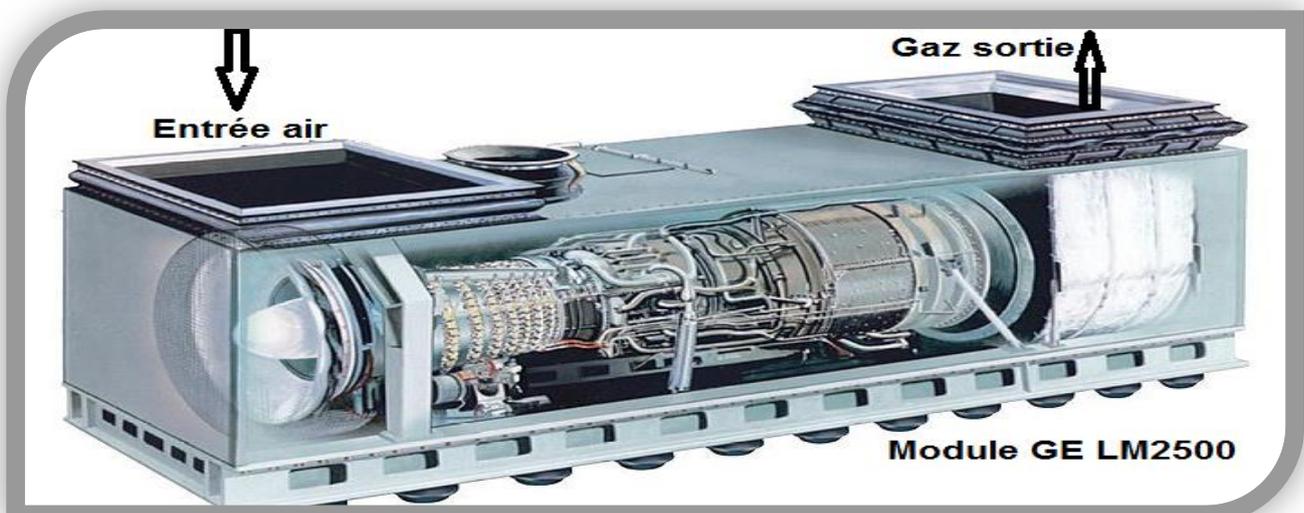


Figure 6 : Le premier brevet relatif d'une turbine à gaz.[2]

2.1.2 L'application de la turbine à gaz dans l'industrie de production électrique :

Quand le générateur à turbine à gaz a été introduit à l'industrie de production électrique vers la fin des années 1940, c'était une centrale électrique à combustibles fossiles

autonome révolutionnaire. Vingt ans plus tard, les turbines à gaz ont été établies comme un moyen important de répondre aux charges de pointe à croissance rapide sur les systèmes d'utilité. Au début des années 1990, les turbines à gaz dans divers cycles d'application étaient devenues une partie importante des nouveaux ajouts de production électrique dans le monde. En moins de 50 ans, ce qui était à l'origine une technologie de réacteur a été transformé en une solution de haute technologie essentielle à de nombreux besoins de production électrique.

La technologie des turbines à gaz a été appliquée pour la première fois dans les réacteurs des avions et a fini par être transformée en gros moteurs terrestres, appelés unités industrielles lourdes. Les réacteurs ont été emballés dans des turbines à gaz aéro-dérivées. Les machines aéro-dérivées et les machines industrielles lourdes sont deux lignes de produits distinctes. De loin, la majorité des turbines à gaz utilisées dans la production électrique sont de type industriel lourd. Ces machines sont généralement moins chères par kilowatt et moins efficaces que les unités aéro-dérivées

Les turbines à gaz sont construites dans une grande gamme de taux de rendement à des conditions ISO (288.15 °K, une humidité relative de 60 % et une pression barométrique ambiante de 1.013 bar (équivalente aux conditions de niveau de mer moyen). [1]

2.2 Turbine à gaz STG5-4000F :

La centrale électrique à cycle combiné de RAS DIJNET se compose de trois (3) turbines à gaz SGT5-4000F Siemens.

Les turbines à gaz de la chambre de combustion annulaire Siemens sont des machines mono-arbre d'une conception mono-boîtier.

Un rotor commun est partagé par le compresseur et la turbine. Le rotor est supporté dans deux roulements qui se situent en dehors de la région pressurisée. Un boîtier externe sous pression commun est aussi partagé par le compresseur et la turbine. Il inclut différentes sections. Les sections du boîtier sont boulonnées et forment une unité cylindrique rigide qui transmet toutes les forces qui s'appliquent durant le transport et l'exploitation sur les supports.

Le boîtier s'appuie sur les supports sur le support de palier frontal et sur le boîtier externe arrière.

Le compresseur est un compresseur axial de haute efficacité à 15 étages avec une distribution de débit optimisée. Chaque étage inclut une rangée d'aubes de rotor et une rangée d'ailettes.

La turbine à gaz est conçue pour allumer deux carburants. Le gaz naturel doit être allumé comme carburant primaire et le mazout de distillation doit être allumé comme carburant de secours. La turbine à gaz est conçue pour fonctionner à 100 % de charge en allumant le gaz naturel et le mazout.

En pratique, il y a plusieurs cycles de turbine à gaz (le cycle simple et cycle combiné) qui augmentent l'efficacité de la turbine à combustion ou la puissance électrique. Dans chacune des variations, l'efficacité ou la puissance générée est augmentée en augmentant le débit massique à travers la turbine de puissance, en récupérant la chaleur du gaz rejeté, en réduisant le travail du compresseur ou en augmentant la température moyenne de la source de chaleur. Certains des cycles généralement utilisés sont comme suit :

Tableau 1: Le premier brevet relatif d'une turbine à gaz.

Cycles de la turbine à gaz	
Cycle de refroidissement par évaporation	Cycle de réchauffement
Cycle de génération	Cycle d'injection de vapeur à refroidissement intermédiaire
Cycle à refroidissement intermédiaire	Cycle d'injection de vapeur de réchauffage à refroidissement intermédiaires
Turbine à air humide	Cycle à récupération chimique de réchauffe à refroidissement intermédiaire
Cycle d'injection de vapeur	

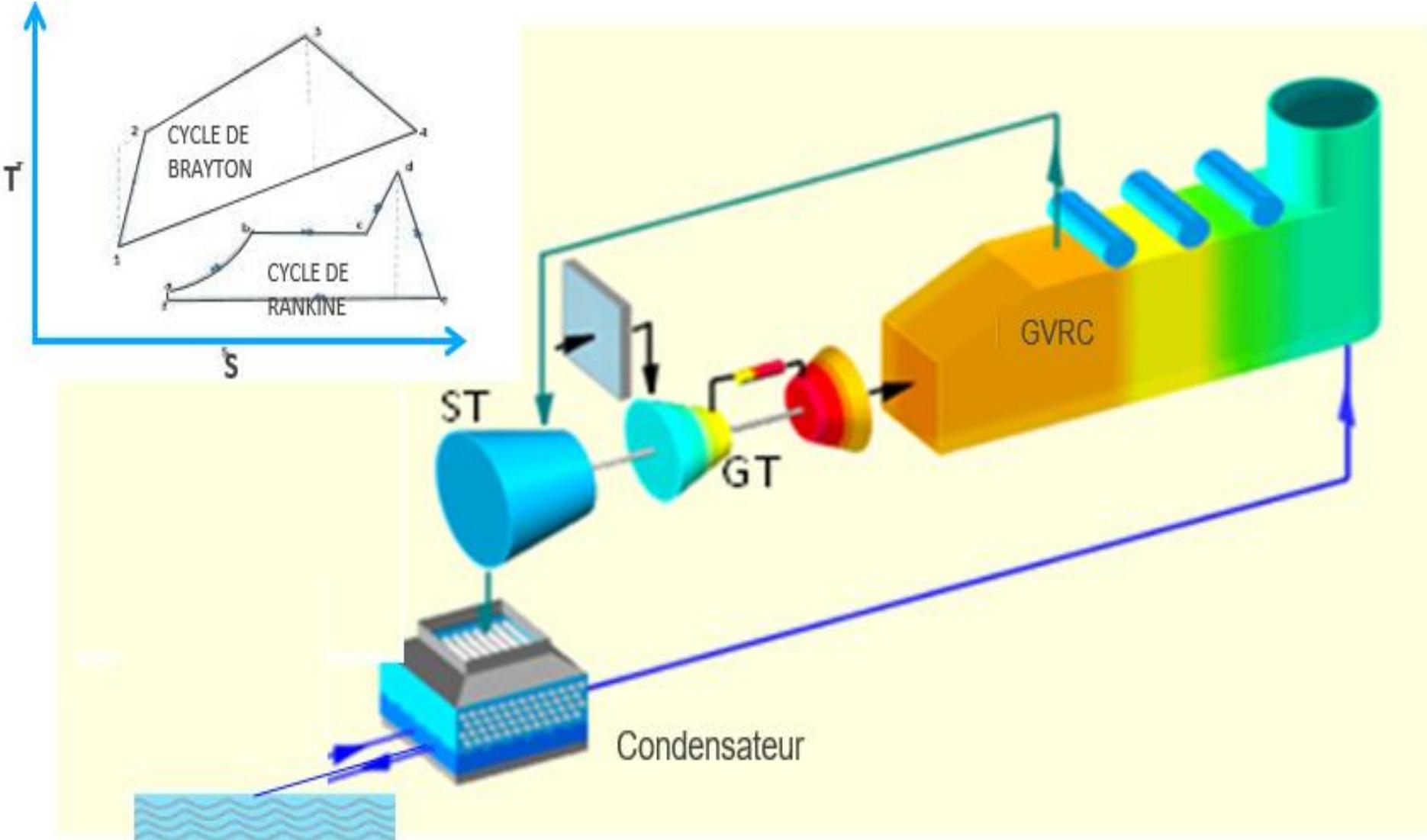
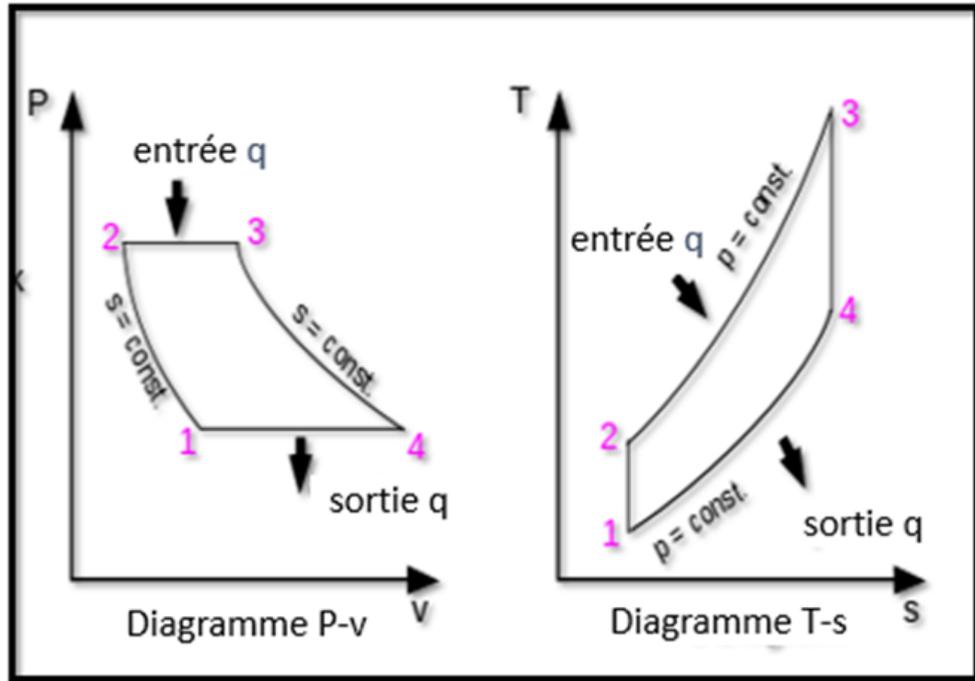


Figure 7 : Cycle de turbine à gaz en mode cycle combiné (Disposition mono-arbre). [1]



CYCLE DE BRAYTON

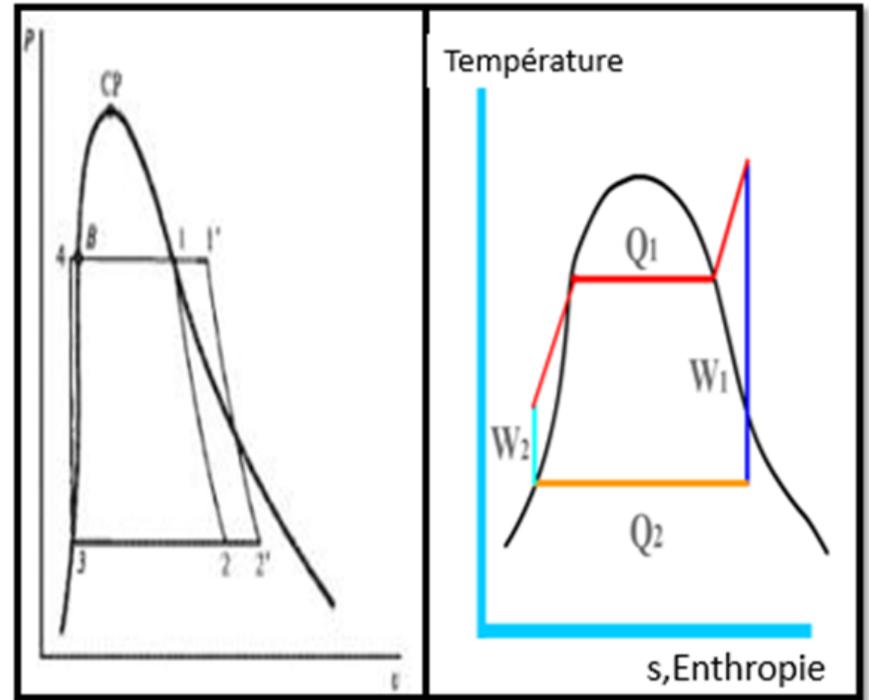


Diagramme P-v

Diagramme T-s

CYCLE DE RANKINE

Figure 8: Différents cycles (Brayton, Rankine).[2]

2.3 Les Composants de base de la turbine à gaz :

- Compresseur : Aspire l'air et le comprime.
- Chambre de Combustion : Carburant pompé et allumé, pour bruler de l'air comprimé.
- Turbine : Gaz chauds convertis en travail, pour actionner le compresseur et la charge externe.

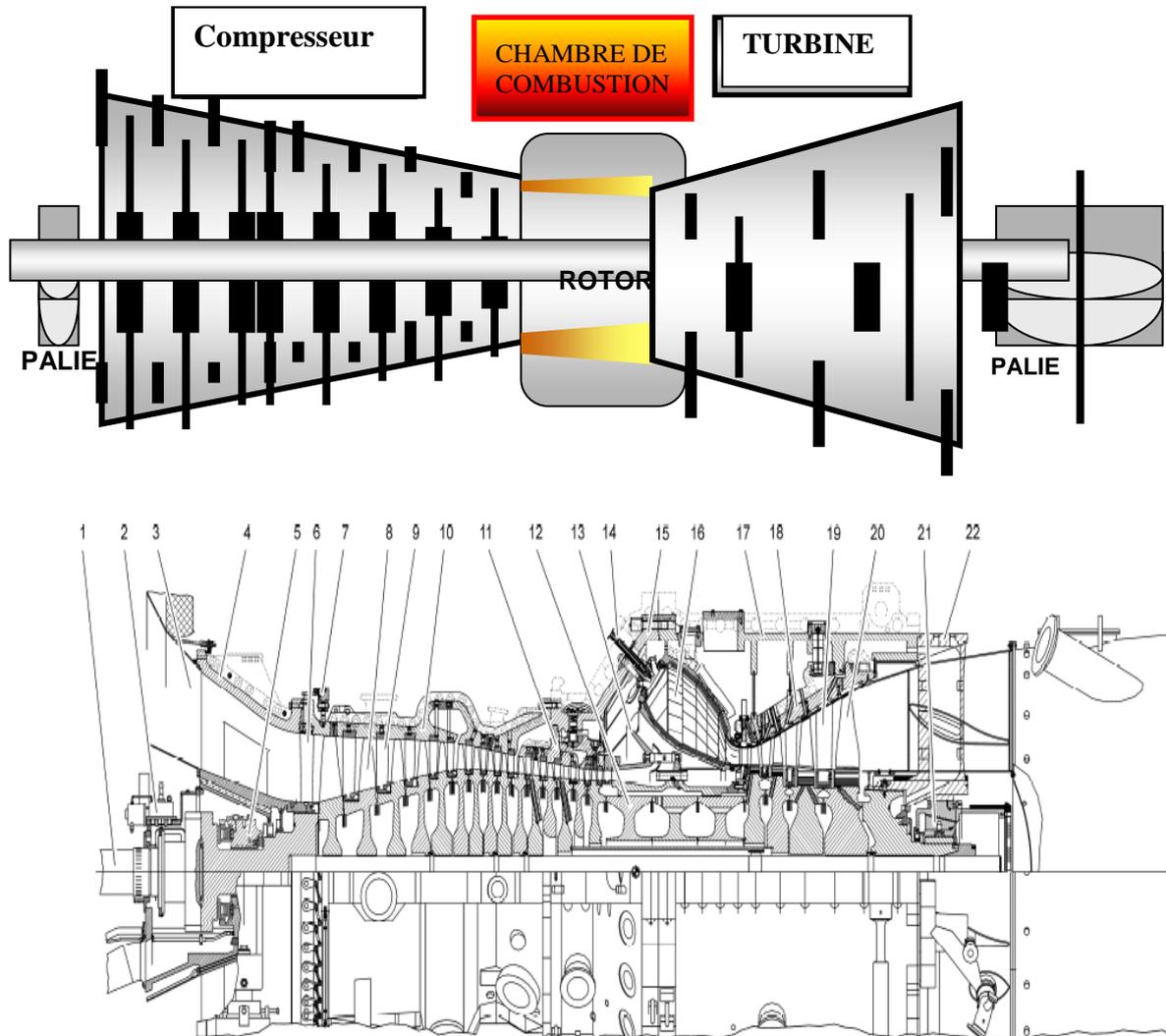


Figure 9 : Les Composants de base de la turbine à gaz. [1]

Tableau 2 : Composants de base de la turbine à gaz: Composants de base de la turbine à gaz.

1	Arbre intermédiaire
2	Vireur hydraulique
3	Conduit d'admission
4	Boitier du roulement du compresseur
5	Palier de la butée et d'essieu combiné
6	Aubes directrices d'entrée à pas variable
7	Système de réglage
8	Aubes mobiles de compresseur
9	Aubes stationnaires du compresseur
10	Porteur 1 des aubes stationnaires
11	Porteur 2 des aubes stationnaires
12	Rotor
13	Diffuseur d'échappement
14	Montage de bruleur
15	Boitier externe 2
16	Chambre de combustion
17	Boitier externe droit
18	Montage des aubes stationnaires de turbine
19	Aubes stationnaires de turbine
20	Aubes mobile de turbine
21	Palier d'essieu
22	Boitier d'échappement

2.3.1 Compresseur d'air multi-étage :

En général, l'air d'admission est comprimé en étages par une série d'aubes sous forme de voilure stationnaire et rotative. Les aubes rotatives (rotor) fournissent de la force pour augmenter la vitesse de l'air dans chaque étage et les aubes stationnaires (stator) convertissent la vitesse en pression et guident aussi l'air vers le prochain étage du rotor. Les aubes du rotor du compresseur sont attachées à des roues qui sont tournées par l'arbre de la turbine à gaz.

L'air comprimé refoulé du compresseur est dirigé vers le système de combustion.

Une grande partie de l'air comprimé est utilisée comme de l'air de combustion dans la turbine.

La petite partie restante de l'air comprimé est extraite de différents étages du compresseur et utilisée pour les accessoires de la turbine à gaz (ex. Refroidissement des aubes de la turbine, le nettoyage du filtre à air d'entrée et l'étanchéité du roulement).

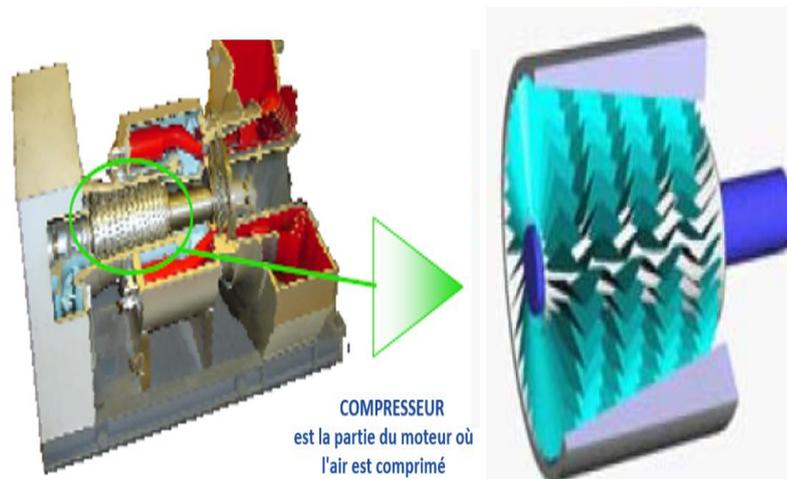


Figure 10 : Compresseur d'air multi-étage. [1]

2.3.2. Les principaux composants du compresseur d'air multi-étages :

➤ **Rotor :**

Fonction :

Le rotor porte les aubes du compresseur à 15-étages et l'aubage de la turbine à 4-étages, il convertit l'énergie cinétique en pression dans le compresseur et la pression en couple dans la turbine.

L'excès de couple est transmis via la bride d'accouplement à l'extrémité du compresseur pour actionner un générateur.

Le rotor inclut l'arbre creux frontal, quinze disques de roues du compresseur, trois disques de couple, quatre disques de roues de la turbine, l'arbre creux arrière, boulon d'ancrage central, les ressorts coniques tronqués et l'écrou du boulon d'ancrage. Les arbres creux et les disques sont maintenus ensemble par le boulon d'ancrage et l'écrou du boulon d'ancrage.

Le rotor est monté sur les paliers aux deux extrémités. Le rotor fonctionne dans le palier d'essieu sur la surface du baril du plus petit de l'arbre creux frontal.

➤ **Aubes du compresseur :**

Fonction :

Les aubes du compresseur convertissent l'énergie mécanique en énergie cinétique en tournant les aubes et l'énergie cinétique en pression de l'air comprimé dans les aubes stationnaires et donc ensemble avec les ailettes contribuent à la hausse de pression.

➤ **Stator du compresseur :**

Fonction :

Le stator a la tâche de sécuriser les bagues à ailettes ainsi que les ailettes individuelles et de transmettre les forces de réaction du flux et de la pression sur le boîtier externe. Les aubes directrices d'entrée à pas variable dans la rangée 0 permettent la modulation du débit massique de l'air aspiré. Ceci améliore l'efficacité à charge partielle du processus de cycle combiné.

Le stator du compresseur est divisé en deux porteurs d'ailettes. Un porteur d'ailettes est rigoureusement monté entre le boîtier du roulement du compresseur et la section boîtier externe 1, formant donc une section du boîtier externe. Le porteur d'ailettes est suspendu dans le boîtier externe 1 pour accueillir la dilatation thermique.

➤ **Ailettes du compresseur :**

Fonction :

Les ailettes du compresseur détournent le débit d'air dans un sens contraire au sens de rotation du rotor, représentant une partie de la hausse de pression. Les aubes directrices d'entrée à pas variable dans la rangée 0 permettent la réduction du débit massique de l'air aspiré. Par conséquent, l'efficacité à charge partielle des centrales à cycle combiné est améliorée.

Les ailettes ainsi que l'anneau externe et l'anneau interne fendu comprennent la bague à ailettes. Les aubes directrices d'entrée à pas variable ont des axes de pivotement sur les deux extrémités et sont supportées dans un anneau externe et un anneau interne.

➤ **Mécanisme d'actionnement des ailettes du compresseur :**

Fonction :

Le débit d'air à travers la turbine à gaz est régulé en ajustant le pas des aubes directrices d'entrée du compresseur. Quand les ailettes sont ouvertes, le débit d'air à travers la turbine à gaz augmente, quand elles sont fermées, il baisse. Ceci permet de maintenir une température d'échappement de la turbine constamment corrigée sur une plage de charge limitée. Par conséquent, l'efficacité à charge partielle des centrales à cycle combiné est améliorée.

➤ **Diffuseur de sortie du compresseur :**

Fonction :

Le diffuseur de sortie du compresseur réduit la vitesse du flux en aval de l'aubage du compresseur. Ceci résulte dans la transformation hautement efficace de l'énergie cinétique de l'air comprimé en pression statique. Les aubes directrices de sortie immédiatement en amont du diffuseur du compresseur préviennent la turbulence excessive lorsque l'air sort de l'aubage du compresseur. Le diffuseur annulaire est un montage composé de trois pièces différentes :

- le diffuseur de sortie.
- les éléments défecteurs.
- la coque de protection.

2.3.3 Chambres de combustion :

La chambre de combustion annulaire est située entre le compresseur et la turbine. En amont de l'entrée de la chambre de combustion, le débit d'air qui est comprimé et chauffé dans le compresseur est divisé en parties :

Une partie circule directement vers la turbine, où elle est utilisée pour refroidir les aubes et les ailettes de la turbine.

L'autre partie entre dans l'espace annulaire entre le boîtier externe de la chambre de combustion et circule autour de la paroi extérieure de la chambre de Combustion et le moyeu de la chambre de Combustion. Ce débit d'air passe à travers les alésages d'air de refroidissement dans la paroi extérieure de la chambre de combustion, alors que la majeure partie de l'air est alimentée dans la zone de combustion via des brûleurs hybrides.

Les 24 brûleurs hybrides sont uniformément distribués autour de la circonférence. L'air est mélangé avec du carburant pour qu'une flamme stable puisse se former dans la zone de combustion. Sachant que la chambre de combustion fonctionne à 100% de charge au travail de la turbine en utilisant soit le gaz combustible ou le mazout.

La courte distance entre les brûleurs hybrides adjacents assure la distribution thermique uniforme à la sortie de la salle de combustion d'où la conversion de l'énergie chimiquement liée au carburant cause l'augmentation du volume du gaz de combustion à l'intérieur de la chambre de Combustion.

Les gaz de combustion sous haute pression sont alimentés à la turbine de détente, où le gradient de pression baisse alors que l'énergie interne est convertie en énergie cinétique. Comparée à d'autres configurations, une chambre de combustion annulaire du bruleur hybride a un ratio favorable de la surface qui doit être refroidie selon le volume, ceci résulte dans une basse consommation de l'air de refroidissement spécifique.

La chambre de combustion annulaire inclut une zone de combustion conique à rotation symétrique dont la section transversale baisse vers la sortie de la chambre de combustion. Le schéma au-dessous montre une section longitudinale à travers la chambre de combustion annulaire.

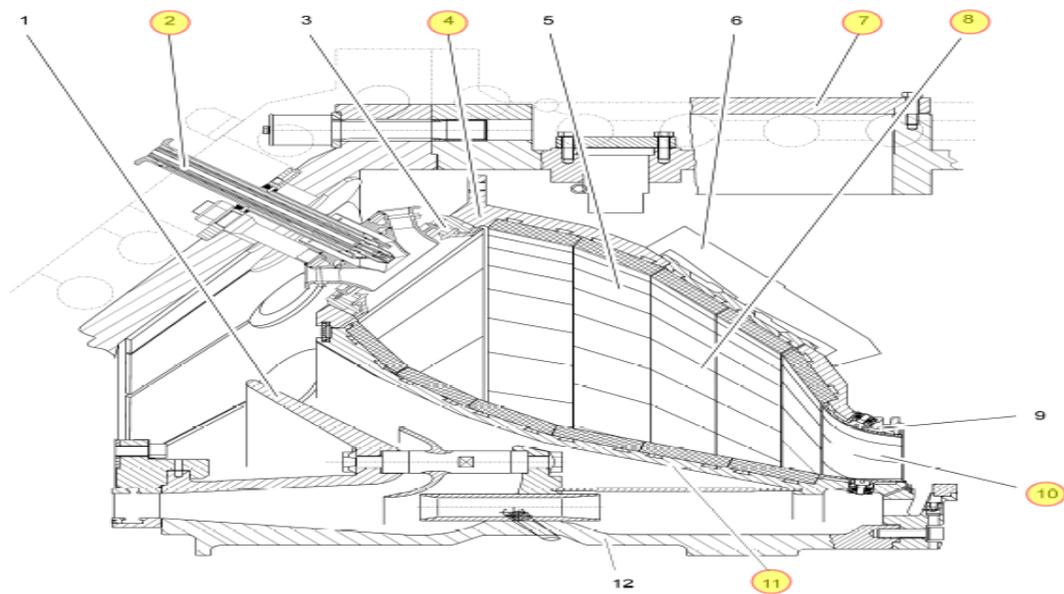


Figure 11: Composants de la chambre de combustion. [1]

Tableau 3 : Composants de la chambre de combustion.

1	Diffuseur de déflexion
2	Bruleur hybride
3	Support de bruleur
4	Coque externe de la chambre de combustion
5	Bouclier thermique en céramique
6	Trou d'homme
7	Boitier externe de la chambre de combustion
8	Zone de combustion
9	Bec de remplissage de la turbine
10	Sortie de la chambre de combustion
11	Moyeu de la chambre de combustion
12	Coque de protection

2.3.4 Turbine axiale multi-étage :

L'action des gaz de combustion chauds pressurisés qui se développent à travers la section turbine convertissent l'énergie des gaz chauds en travail mécanique.

Les gaz d'échappement chauds à haute énergie sont développés à travers la turbine par une série d'aubes sous forme de voilure stationnaire et rotative. Les aubes stationnaires convertissent la majeure partie des gaz, d'une énergie thermique en énergie cinétique. Cette dernière est ensuite transférée vers les aubes rotatives (aubes de turbines) et convertie en énergie mécanique.

Les turbines de détente de la chambre de combustion annulaire AG Siemens sont des machines mono-arbre d'une conception mono-boîtier. Elles sont convenables pour actionner les générateurs des centrales électriques sous charge de base, charge partielle et sous charge de pointe à des vitesses constantes. Ils sont convenables pour l'exploitation aux carburants liquides ou gazeux.

Une caractéristique d'une turbine à gaz mono-arbre à boîtier simple est le rotor commun partagé par le compresseur et la turbine. Elle est supportée dans deux paliers qui se situent en dehors de la région pressurisée. Ceci fournit la base pour assurer un alignement correct et stable et donc un fonctionnement harmonieux.

2.3.5. Les principaux composants de la turbine axiale multi-étage :

➤ Aubes de turbine (Aubes rotatives) :

Fonction :

Les aubes de la turbine convertissent l'énergie thermique du gaz chaud en énergie mécanique.

Configuration des aubes rotatives :

Les aubes incluent le profil aérodynamique, la plateforme et du pied de pale. La section transversale d'un profil aérodynamique est profilée et son apparence ressemble à celle de l'aile d'un avion. La largeur de la section transversale d'un profil aérodynamique baisse du pied vers la pointe.

Les profils aérodynamiques sont torsadés pour permettre la variation des vitesses circonférentielles du pied vers la pointe. Se référer au schéma suivant :



Figure 12 : Aubes de la turbine. [1]

Tableau 4: Aubes de la turbine.

1	Profil aérodynamique
2	Plateforme
3	Pied de pale
4	Entrée de l'aire de refroidissement

Toutes les aubes sont fabriquées à partir d'alliage à haute température due à la contrainte thermique et mécanique sévère maintenue en service.

Les aubes dans les trois premiers étages du rotor sont équipées de conduits internes pour le refroidissement alors que celles dans le quatrième étage sont des moulages creux équipées de canaux internes dans la région du profil aérodynamique supérieure uniquement dans le but de préserver du poids.

L'air de refroidissement entre dans le profil aérodynamique via le pied de pale et sort des aubes dans les deux premiers étages à travers des alésages de refroidissement par pellicule et des fentes coulées, les dernières sont situées sur le bord de fuite.

Les aubes dans l'étage 3 ont trois canaux d'air de refroidissement qui s'étendent radialement à travers le profil aérodynamique.

L'air de refroidissement entre dans ces aubes via les alésages dans la surface inférieure de la plateforme, circule radialement vers l'extérieur à travers le profil aérodynamique et sort à travers les alésages au niveau de la pointe de l'aube.

➤ **Stator de la turbine :**

Le stator de la turbine a la tâche de sécuriser les ailettes en position et de transmettre les forces de réaction du flux et de la pression sur le boîtier externe.

Configuration du stator :

Le stator de la turbine se compose du porteur d'ailettes, des ailettes, des bagues de guidage, et des bagues du presse-étoupe. Le porteur d'ailettes est suspendu dans le boîtier externe pour supporter la dilatation thermique.

➤ **Ailettes de la turbine :**

Fonction :

La dilatation se produit à travers les ailettes de la turbine (aubes stationnaires/buses) (c'est-à-dire la pression est convertie en énergie cinétique). Ensemble avec les aubes de la turbine, les ailettes de la turbine convertissent l'énergie cinétique du fluide moteur en énergie mécanique.

Principe de fonctionnement :

Les ailettes de la turbine incluent chacun une enveloppe externe, un profil aérodynamique et une enveloppe interne.

L'enveloppe externe sécurise l'ailette dans le porteur d'ailettes et forme la limite extérieure du trajet du gaz chaud.

L'enveloppe interne forme une partie de la limite intérieure du trajet du gaz chaud et supporte le joint de l'arbre interne.

Les ailettes sont des pièces coulées des alliages à haute température due aux contraintes sévères maintenues à des températures de métal élevées rencontrées en service.

Pour atténuer les contraintes thermiques, les ailettes dans les trois premières rangées sont équipées d'un revêtement servant de barrière thermique en céramique ; celles dans la quatrième rangée ont un revêtement métallique qui protège contre l'oxydation.

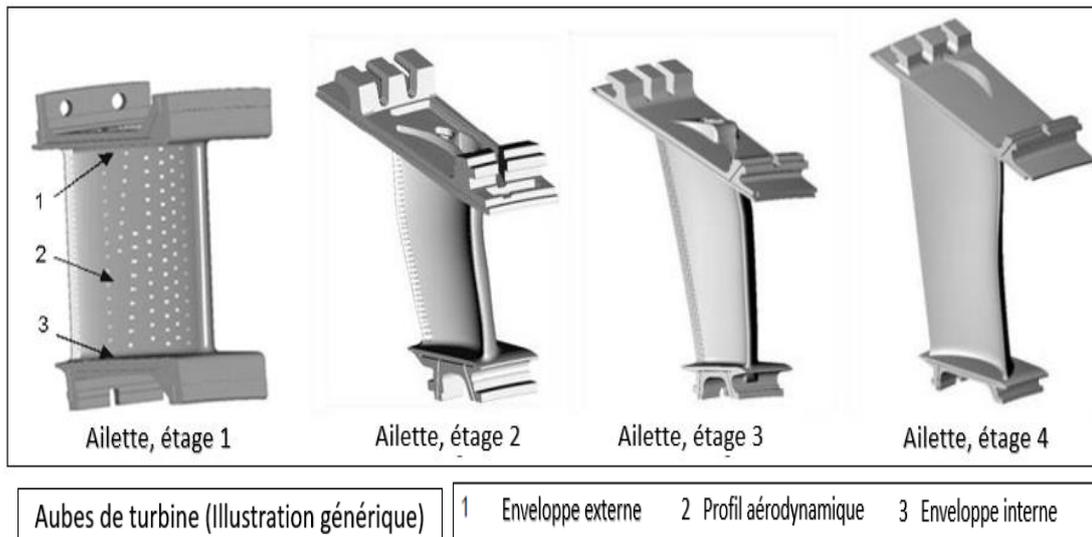


Figure 13 : Ailettes de la turbine. [1]

➤ **Boitier de la turbine :**

Il y a deux boitiers importants, l'un est le boitier externe 1 et le boitier externe 2.

Fonction du boitier externe 1 :

Le boitier externe 1 forme une partie de la coque externe sous pression de la turbine à gaz. Il est situé entre le porteur 1 d'aubes stationnaires du compresseur (la section sous basse pression du compresseur) et le boitier externe 2 (la limite sous pression contenant la chambre de combustion annulaire du bruleur et la turbine)

Le boitier externe 1 est divisé horizontalement sur la ligne médiane. Il contient le porteur 2 d'aubes stationnaires du compresseur et il contient les bruleurs.

Configuration du boitier externe 1 :

Le boitier externe 1 est une construction soudée et il comprend essentiellement les brides de jointure du boitier, demi-coques coniques et cylindriques, et ainsi que les brides de raccordement au porteur 1 d'aubes stationnaires et au boitier externe 3. Les pièces individuelles sont découpées du stock de plaques d'acier, percées dans la mesure du nécessaire et soudées.

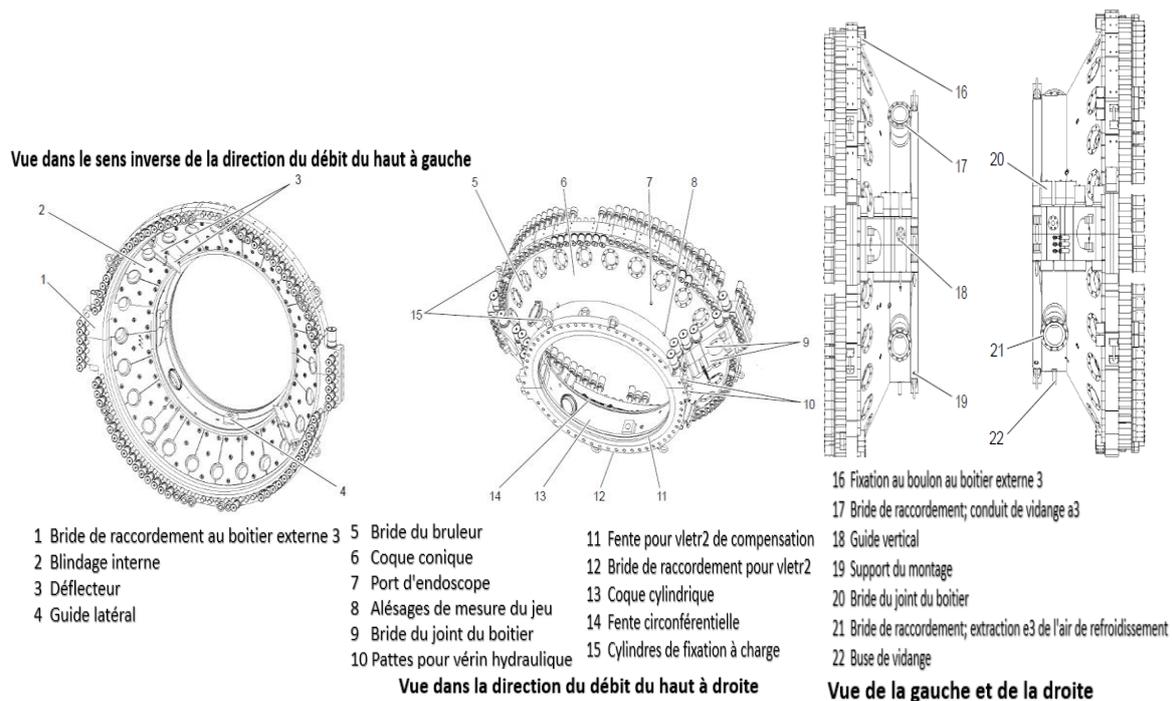


Figure 14 : Boitier de la turbine. [1]

Fonction du boitier externe 2 :

Comme le boitier externe 1, le boitier externe 2 forme une partie de la coque externe sous pression de la turbine à gaz. Il est situé en aval du boitier externe 1 et il enferme la chambre de combustion annulaire du bruleur et la turbine. Il est divisé horizontalement sur la ligne médiane. Le boitier du palier de l'extrémité de la turbine qui supporte cette extrémité du rotor est bridée à son extrémité en aval.

Configuration du boitier externe 2 :

Le boitier externe 2 est une construction soudée, ces pièces individuelles sont découpées d'un stock de plaques d'acier avec un chalumeau, pliées dans la mesure nécessaire et puis soudées. Il comprend essentiellement les brides de jointure du boitier, les demi-coques cylindriques, et ainsi que les brides de raccordement au boitier externe 1 et au boitier du roulement de la turbine.

Se référer au schéma fourni dans la diapositive suivante pour l'identification des pièces.

CHAPITRE 2 : Détail et composition de la turbine à gaz

- 11 Ajustement de la hauteur de la turbine
- 19a Demi-coque, section supérieure
- 19b Demi-coque, section inférieure
- 20 Air de purge et de saisi
- 21 Bride du joint du boîtier
- 23 Bride du joint du boîtier
- 24 Bride au boîtier externe 2
- 25 Nervure semi-circulaire
- 26 Nervure semi-circulaire
- 27 Guide latéral de la chambre de combustion annulaire du bruleur
- 28 Nervure semi-circulaire
- 29 Mécanisme de charnière
- 30 Ajustement latéral de la turbine

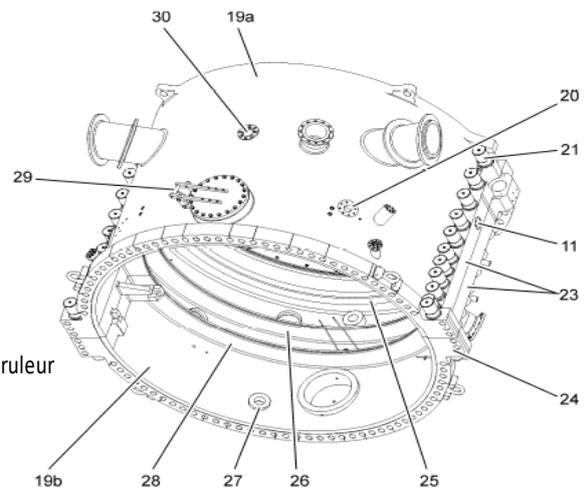
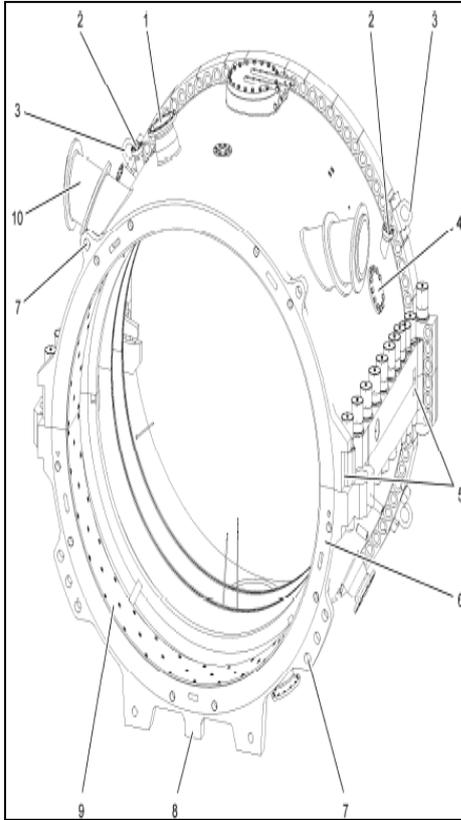
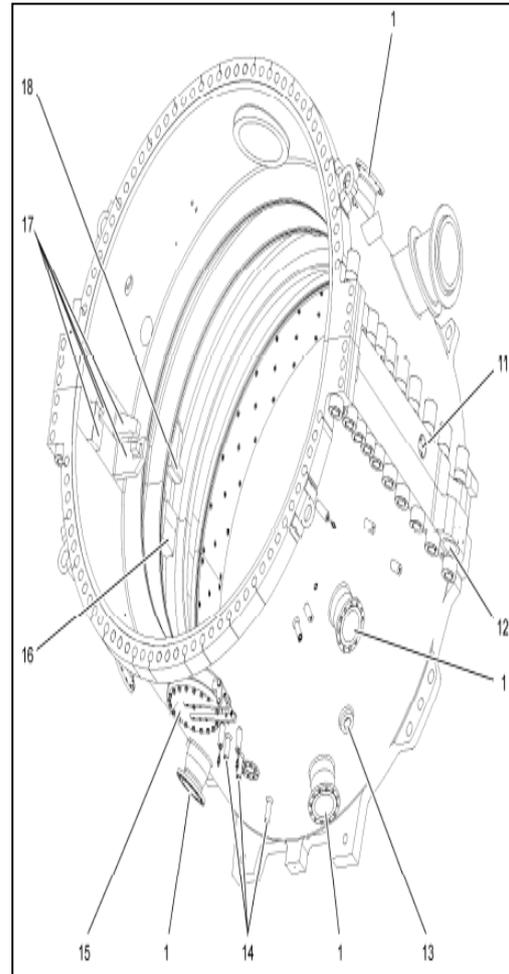


Figure 15 : Turbine axial multi-étage. [1]



- | | |
|------------------------------------|--|
| 1 Bride d'air de refroidissement | 4 Bride aveugle pour le système de dégivrage facultatif |
| 2 Buses de détection de flammes | 6 Bride de raccordement pour le boîtier du roulement de la turbine |
| 3 Anneaux de levage | 9 Isolation |
| 5 Pattes pour le vérin hydraulique | 10 Tourillon |
| 7 Pattes de fixation à charge | 8 Clé pour guidage centrale |

Vue arrière



- | |
|---|
| 1 Bride d'air de refroidissement |
| 11 Réglage de la hauteur de la turbine |
| 12 Point de centrage pour le support de la turbine |
| 13 Support de montage pour le porteur d'aubes stationnaires de la turbine |
| 14 Bise de vidange |
| 17 Points de fixation pour la chambre de combustion annulaire du brûleur |
| 15 Couvercle du trou d'homme |
| 16 Support de la turbine |
| 18 Maintien de la turbine |

Vue de face (en bas à droite)

Figure 16 : Turbine axiale multi-étage. [1]

➤ Diffuseur de gaz d'échappement :

Fonction :

L'échappement de la turbine est alimenté à travers le diffuseur de sortie, le système d'échappement en aval et dans la cheminée. Dans, la pression statique augmente en fonction de la baisse de la vitesse.

Configuration :

Le diffuseur d'échappement inclut une section canalisation conique. Une bride sur son extrémité d'entrée est boulonnée à la garniture du boîtier, son extrémité de sortie est soudée au système d'échappement en aval.

Durant le démarrage et l'arrêt de la turbine à gaz, l'air purgé du compresseur est alimenté à travers les conduits de vidange branchés à trois buses de canalisation qui déchargent dans le diffuseur d'échappement.

Un trou d'homme situé dans la partie supérieure du diffuseur d'échappement est fourni pour permettre l'accès au diffuseur d'échappement durant les inspections.

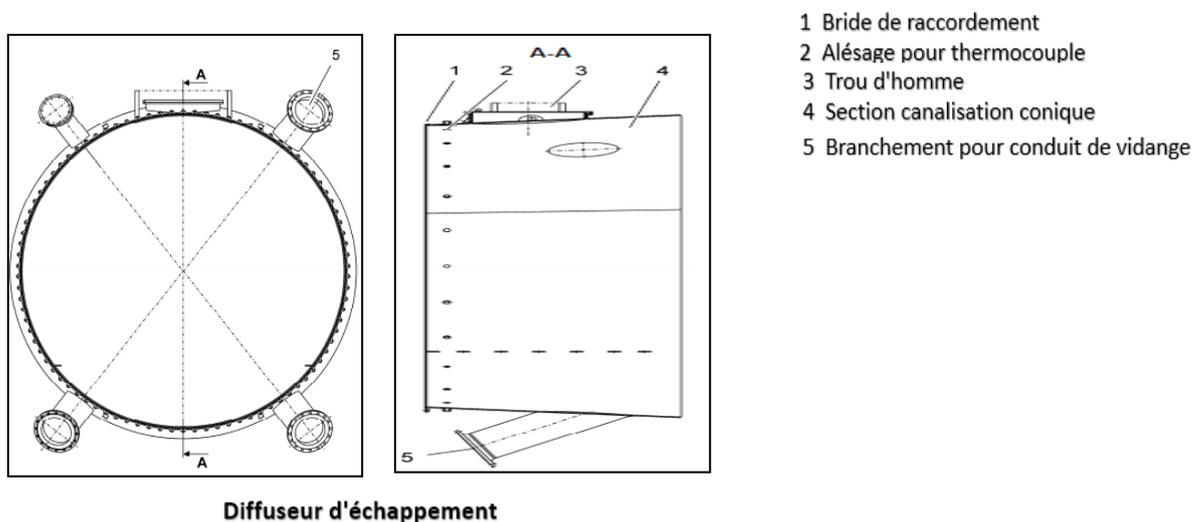


Figure 17 : Diffuseur de gaz d'échappement. [1]

2.4 Mise en marche de la turbine à gaz :

Quand la turbine à gaz est mise en marche, l'air ambiant est aspiré à travers le système d'air d'admission où il est filtré et puis dirigé vers l'entrée du compresseur. L'air est

comprimé par le compresseur et dirigé vers le système de combustion. À l'intérieur du système de combustion, l'air est mélangé au carburant (gaz naturel ou mazout ou les deux ou un autre carburant) et le mélange est allumé. Les gaz de combustion chauffés et comprimés circulent ensuite vers la turbine. Les gaz de combustible se dilatent au fur et à mesure qu'ils circulent à travers la turbine, induisant sa rotation. La turbine rotative actionne le compresseur et les équipements auxiliaires avec un excès d'énergie disponible pour produire une puissance d'arbre qui actionne le générateur électrique. Les gaz sortant de la turbine s'échappent dans l'atmosphère et sont dirigés vers l'équipement de récupération de chaleur à travers un système d'échappement. Le nombre d'étages dans le compresseur et la turbine peut varier, mais il y a toujours un processus de compression suivi par le chauffage, la dilatation du fluide de fonctionnement (le gaz de combustion). La tension d'électricité de sortie du générateur est augmentée par un transformateur élévateur de générateur et alimentée à travers les jeux de barres au réseau ou à une autre destination.

Le cycle de la turbine à gaz est un cycle à flux constant avec un ajout constant d'énergie thermique. Il est fréquemment appelé cycle de Brayton.

Les caractéristiques du cycle d'exploitation sont indiquées sur la carte de volume spécifique à la pression et la carte d'entropie-température. La turbine à gaz, comme une machine à flux continu, est mieux décrite par le premier principe de la thermodynamique.

2.5 Système d'échappement avec silencieux :

2.5.1 Fonction du système d'échappement :

Le système d'échappement guide les gaz d'échappement de la turbine à gaz via le diffuseur d'échappement vers le générateur de vapeur à récupération de chaleur d'une centrale à cycle combiné et finalement vers l'atmosphère à travers la cheminée principale.

Après avoir quitté le dernier étage de la turbine à gaz, les gaz d'échappement sont dirigés à travers un système d'échappement, qui comprend un collecteur d'échappement monté sur l'extrémité de sortie de la turbine. Le plénum d'échappement dirige les gaz d'échappement dans le conduit d'évacuation, qui transporte les gaz chauds dans le conduit d'entrée du générateur de vapeur à récupération de chaleur pour l'utilisation de son énergie thermique. Le système d'échappement comprend un soufflet d'expansion qui permet les mouvements thermiques du plénum et des conduits d'échappement.

Le silencieux est installé dans la cheminée principale du générateur de vapeur à récupération de chaleur. Le silencieux doit être installé pour réduire le bruit à la sortie de la cheminée, car les gaz d'échappement chauds de la turbine à gaz font du bruit. Par conséquent, une séparation est effectuée pour absorber le bruit. Le niveau sonore de sortie du silencieux doit être maintenu à 85 dB (A) dans toutes les conditions de fonctionnement.

2.5.2 Les principaux paramètres du système d'échappement [1]:

Débit de gaz d'échappement à charge de base: 616,2 kg / s (lorsque le carburant est gazeux), 610,9 kg / s (lorsque le carburant est de l'huile).

La température des gaz d'échappement avec compresseur : 607.6°C (lorsque le carburant est gazeux).

Température d'entrée 35 ° C a charge de base 557.4 ° C (lorsque le carburant est de l'huile).

Perte de pression à la sortie de la turbine pour les deux: 36,3 mbar Combustible (gaz et pétrole)

Les principaux paramètres du système d'échappement sont :

- Diffuseur d'échappement
- Plénum d'échappement
- Joint de dilatation
- Conduit d'échappement

Diffuseur d'échappement :

- Les gaz d'échappement de la turbine à gaz passent à travers le diffuseur d'échappement, le système d'échappement aval et dans la cheminée principale pour utiliser l'énergie thermique maximale des gaz de combustion chauds dans le générateur de vapeur à récupération de chaleur. Dans, la pression statique augmente en fonction de la diminution de la vitesse.
- Un trou d'homme situé dans la partie supérieure du diffuseur d'échappement est prévu pour permettre l'accès au diffuseur d'échappement lors des inspections.

Plénum d'échappement :

- Le rôle du plénum d'échappement est de diriger les gaz d'échappement de la turbine à gaz dans les conduits d'échappement.

Joint de dilatation

- La fonction du joint de dilatation est de permettre les mouvements thermiques du plénum d'échappement et du conduit d'évacuation.

Conduit d'échappement :

- La fonction du conduit d'évacuation est de transporter les gaz d'échappement de la sortie de la turbine à gaz dans le conduit d'entrée du générateur de vapeur à récupération de chaleur.

2.6. Système de refroidissement par air et système d'étanchéité :

2.6.1Système de refroidissement par air de la turbine :

Fonction :

- L'aubage de la turbine doit être refroidi par air afin d'éviter que la température du matériel de la turbine ne dépasse les limites maximales admissibles.
- De l'air sous haute pression doit être utilisé pour combler les écarts, les dégagements et les espaces creux à l'intérieur de la turbine à gaz pour des raisons liées à la conception mécanique, ce qui empêche les gaz chauds de pénétrer dans ces régions.
- L'air utilisé à ces fins est extrait d'étages spécifiques du compresseur (points d'extraction du compresseur) et fourni à l'aubage, au rotor et au boîtier de la turbine comme air de refroidissement et d'étanchéité. Parce que, dans la plupart des cas, l'air de refroidissement remplit également des fonctions d'étanchéité, aucune distinction n'est faite entre l'air de refroidissement et l'air d'étanchéité dans le reste de ce texte.
- Le contrôle de l'air de refroidissement assure un refroidissement suffisant et constant des aubes et des ailettes tout en garantissant la fourniture de la quantité d'air de refroidissement adéquate. Les économies d'air de refroidissement réalisées sont utilisées pour améliorer les conditions de combustion et améliorer le comportement de fonctionnement. Les plus importantes économies devraient être réalisées lorsque les aubes directrices d'entrée sont ouvertes et les températures ambiantes élevées.

- L'air de refroidissement doit être fourni à divers niveaux de pression pour les rangées respectives d'aubage de turbine. Il est donc extrait des étages de compression correspondants.
- Une partie de l'air de refroidissement traverse les lignes d'extraction externes en direction des raccordements correspondants sur le boîtier de la turbine. De là, il traverse les portes à aubes en direction des ailettes des étages de la turbine à refroidir. Le point le plus bas de chaque ligne d'extraction acheminé sous l'axe du tuyau de la machine est connecté au système de drainage. Toute eau susceptible de s'y être accumulée pendant le nettoyage du compresseur est évacuée via les conduites de vidange.
- Une autre partie de l'air de refroidissement vers les rangées d'aubes respectives à travers les canaux internes du rotor.

➤ **Débit d'air de refroidissement pour l'étage 1 de la turbine :**

Une partie du débit d'air de sortie du compresseur est utilisée comme air de refroidissement de l'étage 1 de la turbine. Le premier anneau d'ailettes est alimenté avec l'air provenant d'une région correspondante du boîtier en amont des brûleurs ainsi qu'avec l'air extrait de la sortie du compresseur par les tubes de guidage d'air de refroidissement qui sont disposés radialement autour du rotor. L'air de refroidissement de l'étage 1 des aubes de turbine est extrait de la sortie du compresseur et fourni à ces aubes par le biais des canaux internes du rotor. Les équipements de surveillance et de contrôle de l'air de refroidissement ne sont pas fournis.

➤ **Débit d'air de refroidissement pour l'étage 2 de la turbine :**

L'air de refroidissement est extrait en deux points situés en aval de l'étage 13 du compresseur, puis fourni aux ailettes de l'étage 2 de la turbine. Ces points d'extraction sont décalés dans la direction circonférentielle l'un par rapport à l'autre sur le boîtier du compresseur. Un registre de contrôle d'air de refroidissement est installé dans chacune de ces lignes d'extraction d'air de refroidissement pour réguler le débit d'air de refroidissement.

L'air de refroidissement destiné aux aubes mobiles de l'étage 2 de la turbine est extrait en aval de l'étage 12 du compresseur et fourni aux aubes par le biais des canaux internes du rotor.

- Contrôle de l'air de refroidissement des ailettes de l'étage 2 de la turbine

L'air de refroidissement des aubes directrices de l'étage 2 de la turbine est contrôlé à l'aide des registres de contrôle de l'air de refroidissement. Une butée mécanique empêche la fermeture complète des registres de contrôle d'air de refroidissement, garantissant ainsi que le débit minimum d'air de refroidissement requis est constamment fourni aux profils.

➤ **Débit d'air de refroidissement pour l'étage 3 de la turbine :**

L'air de refroidissement est extrait en deux points situés en aval de l'étage 9 du compresseur, puis fourni aux ailettes de l'étage 3 de la turbine. Ces points d'extraction sont décalés dans la direction circonférentielle l'un par rapport à l'autre sur le boîtier du compresseur. Un registre de contrôle d'air de refroidissement est installé dans chacune de ces lignes d'extraction d'air de refroidissement pour réguler le débit d'air de refroidissement.

L'air de refroidissement destiné aux aubes mobiles de l'étage 3 de la turbine est extrait en aval de l'étage 10 du compresseur et fourni aux aubes par le biais des canaux internes du rotor.

– Contrôle de l'air de refroidissement des ailettes de l'étage 3 de la turbine

Le contrôle de l'air de refroidissement des ailettes de l'étage 3 de la turbine est similaire à celui des ailettes de l'étage 2 de la turbine.

➤ **Débit d'air de refroidissement pour l'étage 4 de la turbine :**

L'air est extrait à un point en aval de l'étage 5 du compresseur, puis fourni aux ailettes de l'étage 4 de la turbine. L'air de refroidissement destiné aux aubes de l'étage 4 est extrait en aval de l'étage 10 du compresseur et fourni aux aubes par le biais des canaux internes du rotor.

Les équipements de surveillance et de contrôle de l'air de refroidissement ne sont pas fournis.

➤ **Processus de refroidissement:**

L'air d'étanchéité est extrait à la sortie du compresseur de la turbine à gaz. La température de cet air est cependant trop élevée pour l'étanchéité ; l'air d'étanchéité est donc acheminé vers l'échangeur de chaleur air-air où une partie de la chaleur est évacuée dans l'atmosphère. Les ventilateurs équipés d'un régulateur de vitesse régulent le débit massique du support de refroidissement (air ambiant) à travers l'échangeur de chaleur air-air. L'air ambiant traverse le filtre et est nettoyé en amont de l'entrée de l'échangeur de chaleur. L'air d'étanchéité sort par les conduites de vidange ouvertes en permanence ; ce débit est réduit au

CHAPITRE 2 : Détail et composition de la turbine à gaz

minimum par les orifices. Le clapet de non-retour à battant empêche l'écoulement inverse de la vapeur de mazout par effet de cheminée à travers la conduite de vidange, dans le système d'air d'étanchéité et dans la turbine à gaz.

Conclusion :

Ce chapitre a cité l'idée et le premier brevet de la turbine à gaz au 18^{ème} siècle et les généralités de cette machine. Puis on s'est focalisé sur la Turbine à gaz du type siemens (STG5-4000F) sur laquelle on a pu effectuer notre stage pratique.

***CHAPITRE 3 : Analyse
énergétique et exergétique de
la Turbine à gaz.***

Introduction :

Ce troisième et dernier chapitre du présent travail de ce mémoire sera dédié aux rappels, aux calculs à l'aide d'un couplage entre MATLAB et NST-REFPROP pour utiliser juste les caractéristiques réelles des gaz, et finalement, les résultats qu'on a obtenus sont présentés sous forme de courbes et de tableaux représentant les différents paramètres de performance de la Turbine à gaz type (SGT5-4000F).

3.1 Notions et rappels thermodynamiques :

3.1.1 Rappel fondamental de la Thermodynamique :

L'état thermodynamique d'un fluide (ou d'un système thermodynamique) est Principalement caractérisé par :

- sa pression (P) généralement en bar ou Pascal ou Atmosphère
- sa température (T) généralement en degré Celsius ($^{\circ}$ C) ou en degré Kelvin ($^{\circ}$ K)
- son volume (V) en (m^3) ou en litre l ou son volume spécifique (v) en (m^3 /Kg) ou en (l/Kg) et éventuellement par :
 - son énergie interne (U) en Joule (J) ou Calorie (Cal) ou son énergie interne spécifique ou massique (u) en (J/Kg) ou (Cal/Kg) ou par unité de moles (J/mole) ou (Cal/ mole)
 - son enthalpie (H) en Joule (J) ou (Cal) ou son enthalpie spécifique ou massique (h) en (J/Kg) ou (Cal/Kg) ou par unité de moles (J/mole) ou (Cal/ mole)
 - son entropie (S) en (J/K) ou (Cal/K) ou son entropie spécifique ou massique (s) en [J/ (Kg.K)] ou [Cal/(Kg .K)] ou par unité de moles [J/mole. K] ou [Cal/ mole. K].

N.B : les quantités et fonction d'état thermodynamiques spécifiques ou massiques Seront désignées par des lettres ou symboles minuscules.

3.1.2 Quantités et fonctions d'état thermodynamiques :

Le signe des quantités d'énergie échangées entre un système thermodynamique et le milieu extérieur peut être différent d'un ouvrage à l'autre ou entre la convention Européenne et la convention Américaine. Dans cet ouvrage la convention suivante est adoptée :

- toutes les quantités d'énergie reçues par le système thermodynamique et donc fournis par le milieu extérieur sont considérées positives.
- inversement elles sont considérées négatives.

➤ **Quantité de chaleur [Q] :**

La quantité de chaleur ou d'énergie de chaleur échangée $Q_{1,2}$ (cédée ou fournit) en Joule (J) ou en Calorie (Cal), entre un système thermodynamique et le milieu extérieur, pendant une transformation d'un état thermodynamique initial 1 à un état thermodynamique final 2 est donnée par la relation générale :

$$Q_{1,2} = m \cdot C_x \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.1)$$

Où :

m = masse totale du fluide

T_1 = température du fluide thermodynamique à l'état thermodynamique initial 1

T_2 = température du fluide thermodynamique à l'état thermodynamique final 2

C_x = chaleur spécifique correspondante au processus de la transformation thermodynamique considérée (en Joule ou Calorie par degré et par gramme ou Kilogramme)

$C_x = C_v$: pour un processus à volume constant dit isochore.

$C_x = C_p$: pour un processus à pression constante dit isobare.

$C_x = C_n$: pour un processus poly tropique, de coefficient poly tropique (n), pendant lequel la pression et le volume sont reliés par la relation $PV^n = Cst$.

$C_x = 0$: pour un processus adiabatique (pas d'échange avec le milieu extérieur) et isentropique lorsque le processus est en plus réversible.

La quantité de chaleur ou d'énergie de chaleur correspondante par unité de masse Q_{1-2} , dite massique ou spécifique (en J/Kg ou Cal/Kg) est donnée par la relation générale,

$$Q_{1,2} = C_x \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.2)$$

Dans le cas particulier d'une transformation à température constante, dite isotherme, la quantité de chaleur échangée Q_{1-2} est déterminé à partir de l'équation du premier principe de la thermodynamique qui sera présenté ultérieurement. Dans ce cas la variation de l'énergie interne sera nulle avec la supposition que la variation des énergies potentielle et cinétique sont négligeables ou carrément nulles.

➤ **Quantité de travail [W] :**

La quantité de travail ou d'énergie de travail échangée W_{1-2} (cédée ou fournit) en Joule (J) ou en Calorie 'Cal', entre un système thermodynamique et le milieu extérieur, pendant une transformation d'un état thermodynamique d'un état thermodynamique initial 1 à un état thermodynamique final 2 est donnée par la relation générale :

$$w_{1,2} = - \int_1^2 P dv \quad (3.3)$$

Ou par unité de masse :

$$w_{1,2} = - \int_1^2 P dv \quad (3.4)$$

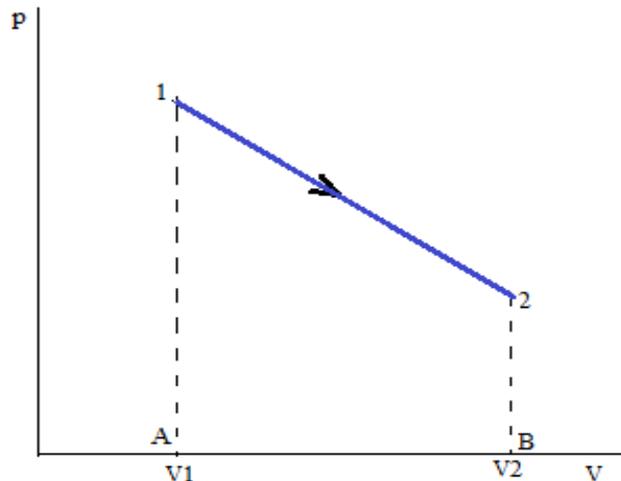


Figure 18 : Transformation 1-2 sur le diagramme P-V (de Clapeyron). [2]

Cette quantité de travail est représentée sur le diagramme P-V (de Clapeyron) de la figure par la surface 1-2-B-A limitée par la transformation 1-2 et le segment A-B (V1-V2).

➤ **Energie interne [U]:**

L'énergie interne est déterminée sous forme de variation entre deux états 1 et 2 d'une transformation thermodynamique d'un système et elle est égale à la somme des quantités de chaleur et de travail échangé pendant cette transformation, soit pour la masse totale :

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \quad (3.5)$$

Où :

$$\Delta U_{1,2} = U_2 - U_1 = Q_{1-2} + W_{1,2} = Q_{1,2} - \int_1^2 P dV \quad (3.6)$$

Avec :

$U_2 - U_1$ = variation de l'énergie interne pendant cette transformation.

$Q_{1,2}$ = quantités de chaleur échangée pendant cette transformation.

$W_{1,2} = - \int_1^2 P dV$ = quantité de de travail échangées pendant cette transformation et dont l'expression dépend du type de celle-ci.

Les équations par unité de masse donnent :

$$\Delta u = \Delta q + \Delta w \quad (3.7)$$

Ou :

$$\Delta U_{1,2} = u_2 - u_1 = q_{1,2} + w_{1,2} = q_{1,2} - \int_1^2 P dV \quad (3.8)$$

➤ **Enthalpie [H] :**

L'enthalpie est égale à la somme de l'énergie interne (U) et du produit de la pression (P) et du volume (V) soit :

$$H = U + PV \quad (3.10)$$

Soit pour la variation d'enthalpie :

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(P.V) \quad (3.11)$$

Les équations sous forme massique deviennent respectivement

$$h = u + P.v \quad (3.12)$$

$$\Delta h = \Delta u + \Delta(p.v) \quad (3.13)$$

➤ **Entropie[S] :**

La variation de l'entropie pendant une transformation thermodynamique 1-2 qui découle du second principe de la thermodynamique est donnée par :

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad (3.14)$$

Qui donne :

$$\Delta S_{1,2} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad (3.15)$$

Ou sous forme massique :

$$\Delta S_{1,2} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T} \quad (3.16)$$

Pour une transformation isotherme (T=cts) :

$$\Delta S_{1,2} = S_2 - S_1 = \frac{Q_{1-2}}{T} \quad (3.17)$$

➤ **Exergie [Ex]:**

L'exergie (E_x) qui permet d'englober les deux premiers principes de la thermodynamique dans l'analyse thermodynamique d'un système (bilan exergetique), est égale à la différence entre l'énergie interne (U) et le produit de la température du milieu extérieur (T₀) par l'entropie(S):

$$E_x = H - T_0 . S \quad (3.18)$$

Ou sous forme massique :

$$E_x = h - t_0 . s \quad (3.19)$$

Remarque : Lors d'une transformation thermodynamique le travail maximum que peut fournir un système thermodynamique est égal à la diminution de son énergie.

3.2 Notion d'énergie ainsi différents bilans:[3]



Figure 19 : système énergétique .

Énergie total entrante au système = énergie total échangé du système + énergie total du système

Energie entrante :

$$\dot{E}_{en} = \sum \dot{Q}_{en} + \sum \dot{W}_{en} \quad (3.20)$$

Energie sortante :

$$\dot{E}_{sort} = \sum \dot{Q}_{sort} + \sum \dot{W}_{sort} \quad (3.21)$$

D'où :

$$\Delta \dot{E}_{sys} = \dot{E}_{en} - \dot{E}_{sort} \quad (3.22)$$

$$\Delta \dot{E}_{sys} = \dot{E}_{en} - \dot{E}_{sort} = \dot{m} (E_{en} - E_{sort}) \quad (3.23)$$

3.3 Différents bilans thermodynamique :

3.3.1 Bilan massique :

$$\sum \dot{m}_{en} = \sum \dot{m}_{sort} + \frac{dm_{cv}}{dt} \quad (3.24)$$

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \dot{m}_{en} - \sum \dot{m}_{sort} \quad (3.25)$$

3.3.2 Bilan énergetique :

$$\Delta \dot{E}_{sys} = m \left[\left(u_2 + \frac{1}{2} v_2^2 + g z_2 \right) - \left(u_1 + \frac{1}{2} v_1^2 + g z_1 \right) \right] \quad (3.26)$$

3.3.3 Bilan entropique :

$$\sum S_{\text{en}} + S_{\text{gen}} = \sum S_{\text{sort}} + \Delta S_{\text{sys}} \quad (3.27)$$

$$\sum \dot{S}_{\text{en}} + \dot{S}_{\text{gen}} = \sum \dot{S}_{\text{sort}} + \frac{d\dot{S}_{\text{sys}}}{dt} \quad (3.28)$$

$$S_{1_2} = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad (3.29)$$

3.4 Notion d'exergie et étude:

3.4.1 Définition : [3]

Exergie représente le travail maximum qu'un système thermodynamique peut produire lorsqu'il s'équilibre avec son environnement. Cette affirmation suppose qu'à l'état initial, il existe un système thermodynamique qui n'est pas en équilibre avec l'environnement. De plus, il est supposé que - du moins potentiellement - des mécanismes de transfert d'énergie (et de masse) entre le système et l'environnement existent, de sorte que le système puisse évoluer pour que la condition d'équilibre apparaisse. Le système doit au moins échanger du travail avec l'environnement. Une autre remarque est que la définition d'exergie suppose l'existence d'un environnement de référence. Le système sous l'analyse n'interagira qu'avec cet environnement.

Dans de nombreux problèmes pratiques, l'environnement de référence est supposé être l'atmosphère terrestre, caractérisée par sa température et sa pression moyennes: $P_0=101,325$ kPa, $T_0=298,15$ K. L'exergie ne peut être conservée. Tout processus réel détruit l'exergie car, de même, il génère une entropie. L'exergie est détruite et l'entropie est générée en raison d'irréversibilités. L'exergie n'est pas seulement une quantité exprimant le potentiel maximum d'un système de travail dans un environnement défini, mais qu'elle permet également de mesurer le potentiel d'une substance à avoir un impact sur l'environnement. L'exergie d'un système thermodynamique fermé (sans écoulement) comprend quatre termes, à savoir physique (ou thermomécanique), chimique, cinétique et potentiel. En résumé, l'exergie totale d'un système sans flux s'écrit de la manière suivante.

$$E_{\text{xt}} = E_{\text{xph}} + E_{\text{xch}} + E_{\text{xcit}} + E_{\text{xpo}} \quad (3.30)$$

Or pour une exergie total avec un flux s'écrit :

$$E_{\text{xtf}} = E_{\text{xt}} + (P - P_0)V \quad (3.31)$$

L'exergie physique est définie comme suite :

CHAPITRE 3 : Analyse énergétique et exergétique de la Turbine à gaz

$$Ex_{ph} = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (3.32)$$

Où U est l'énergie interne, le volume V et l'entropie S d'un système fermé qui n'est pas en équilibre avec l'environnement, T_0 est la température de référence de l'environnement.

Pour l'exergie cinétique est :

$$Ex_{cint} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.33)$$

Où m est la masse du système et v sa vitesse (macroscopique). De plus, l'énergie potentielle est :

$$Ex_{pt} = m \cdot g \cdot (z - z_0) \quad (3.34)$$

Où z est l'élévation du système et z_0 une élévation de référence de l'environnement, ainsi que g représente la gravité.

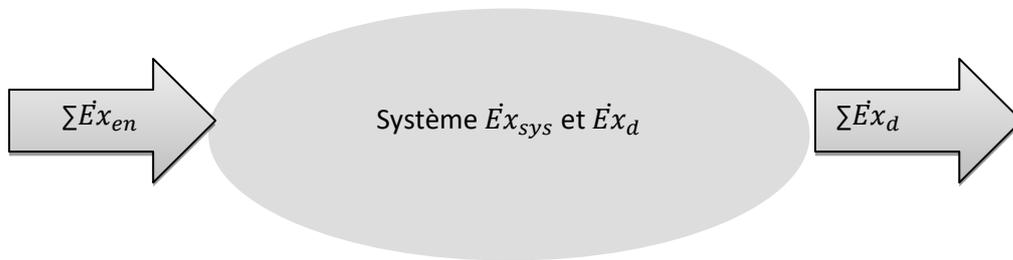
En fin pour l'exergie chimique, c'est un facteur très importante dans les systèmes de production d'énergie basés sur des systèmes de combustion de carburant ou de production d'énergie basés sur des processus électrochimiques (par exemple, des piles à combustible) et chaque fois que des réactions chimiques ou d'autres processus tels que le mélange, l'absorption, la désorption, la séparation et la concentration se produisent. L'exergie chimique comprend deux composants principaux: l'exergie due à la réaction chimique et l'exergie due à la différence de concentration. Lorsqu'un composé chimique est autorisé à interagir avec l'environnement, des réactions chimiques peuvent survenir, impliquant des espèces instables. Finalement, des espèces plus stables se forment et une réaction supplémentaire n'est pas possible. De plus, si les composés du système ont une concentration de phase différente de celle correspondant à l'environnement, différents processus peuvent alors être dilués ou concentrés, jusqu'à ce qu'il n'y ait pas de différence de concentration entre les composants du système et l'environnement. Lorsqu'il n'y a pas de potentiel de réaction chimique avec l'environnement et que tous les composants du système sont à la même concentration que l'environnement, le système est en équilibre chimique complet avec l'environnement. Sachant que l'exergie chimique dépend des caractéristiques du carburant utilisé. l'exergie chimique existante seulement dans la phase de la chambre de combustion est :

$$Ex_{ch} = 1.06 \times PCI \quad (3.35)$$

3.4.2 Bilan exergetiques d'un système : [3]

Basé sur le concept d'exergie, pour un système fonctionnant en régime permanent avec entrée et sortie, le bilan exergetique est défini comme une expression mathématique, L'ExBE introduit le terme exergie détruite, qui représente le potentiel de travail maximum qu'il est impossible de récupérer à des fins utiles en raison d'irréversibilités. Pour un système réversible, il n'y a pas de destruction d'exergie car tout le travail généré par le système peut être rendu utile. Il existe un lien direct entre la destruction par exergie, la génération d'entropie et la température de référence de l'environnement, à savoir :

$$Ex_d = T_0 \Delta S_{gen} \tag{3.36}$$



$$\underbrace{\sum \dot{E}x_{en}}_{\text{Exergie Total entrante}} = \underbrace{\frac{d\dot{E}x_{sys}}{dt}}_{\text{Exergie échangée}} + \underbrace{\sum \dot{E}x_{sort}}_{\text{Exergie sortante}} + \underbrace{\sum \dot{E}x_d}_{\text{Exergie détruite}} \tag{3.37}$$

- $\dot{E}x_d > 0$ un processus irréversible
- $\dot{E}x_d = 0$ un processus réversible [3]
- $\dot{E}x_d < 0$ un processus impossible

Ce schéma explicatif illustre des exergies entrantes et sortantes, ainsi que les destructions et pertes d'exergie. Dans un système thermodynamique, l'exergie totale qui pénètre dans le système doit être contrebalancée par l'exergie totale quittant le système, plus le changement de contenu de l'énergie du système à la destruction de l'exergie. L'exergie peut être transférée d'un système à l'autre par trois moyens: travail, chaleur et masse. Par conséquent, l'ExBE peut être exprimé généralement sous forme de taux comme suit:

Ex BE :

$$\sum_{en} \left[\dot{W} + m\varphi + \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \right] = \sum_{sort} \left[\dot{W} + m\varphi + \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \right] + \dot{E}x_d \tag{3.38}$$

S'il y'a qu'un seul flux :

$\dot{E}x_{BE}$:

$$\sum_{en} \left[\dot{W} + \dot{m}\varphi + \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \right] = \sum_{sort} \left[\dot{W} + \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \right] + \dot{m}(\varphi_2 - \varphi_1) + \dot{E}x_d \quad (3.39)$$

L'exergie due au transfert du travail ($\dot{E}x_W$) doit être égale au travail car, par définition, exergie représente le potentiel maximal d'un système pour effectuer un travail.

3.5 Analyse exergetique réelle du cycle :

A une température ambiante égale à : $T=25^\circ\text{C}$. L'exergie totale est la somme des deux exergies physique et chimique on négligeant celle de la cinétique et potentiel. Or les parties compression et turbine produisent une exergie physique par contre la partie combustion produit une somme de deux exergies physique et chimique.

Partie compression:[3]

$$\dot{E}x_{in} - (\dot{E}x_{out} + \dot{E}x_{det}) + \dot{W}_c = 0 \quad (3.40)$$

D'où :

$$\dot{E}x_{det} = \dot{E}x_{out} - \dot{E}x_{in} - \dot{W}_c \quad (3.41)$$

$$\dot{E}x_{in} = \dot{m}_a \times (h_1 - T_0(S_1 - S_0)) \quad (3.42)$$

$$\dot{E}x_{out} = \dot{m}_a \times (h_2 - T_0(S_2 - S_0)) \quad (3.43)$$

$$\dot{W}_c = \dot{m}_a \times (h_2 - h_1) \quad (3.44)$$

Partie combustion [3]:

D'après DINCER le bilan exergetique de la chambre de combustion s'écrit sous la forme suivante :

$$\dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out} + \dot{E}x_{ch} + \dot{E}x_{det} = 0 \quad (3.45)$$

$$\dot{E}x_{det} = (\dot{E}x_{out} - \dot{E}x_{in}) - \dot{E}x_{ch} \quad (3.46)$$

$$\dot{E}x_{in} = \dot{m}_a \times (h_2 - T_0(S_2 - S_0)) + \dot{E}x_f \quad (3.47)$$

$\dot{E}x_f$ = Selon les caractéristiques des exergies molaires du fuel qu'on a et la calcule sur MATLAB.

$$\dot{E}x_{out} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) \times (h_3 - T_0(S_3 - S_0)) \quad (3.48)$$

Sachant que :

Et :

$$Ex_{ch} = 1.06 \times \dot{m}_f \times PCI \quad (3.49)$$

Partie Turbine : [3]

$$\dot{Ex}_{in} - \dot{Ex}_{out} + \dot{Ex}_{det} - \dot{W}_t = 0 \quad (3.50)$$

$$\dot{Ex}_{det} = \dot{Ex}_{out} - \dot{Ex}_{in} + \dot{W}_t \quad (3.51)$$

$$\dot{Ex}_{in} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) \times (h_3 - T_0(S_3 - S_0)) \quad (3.52)$$

Sachant que :

$$\dot{Ex}_{in} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) \times (h_3 - T_0(S_3 - S_0)) \quad (3.53)$$

$$\dot{Ex}_{out} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) \times (h_4 - T_0(S_4 - S_0)) \quad (3.54)$$

$$\dot{W}_t = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) \times (h_3 - h_4) \quad (3.55)$$

Sachant que l'exergie d'air d'admission et l'exergie du fuel sont calculées à partir de MATLAB selon l'exergie de chacun de leurs composants ainsi leurs fractions massiques. Le tableau ci-dessous montre les exergies des composants :

Tableau 5: Composition chimique et exergie molaires.

Composants chimiques.	Exergie molaire (KJ/Mole).
H_2O	1.3
CO_2	20
N_2	0.66
O_2	3.9
He	30.16
Ar	12
CH_4	832.16
C_2H_6	1496.92
C_3H_8	2151.69
C_4H_8	2657.48
C_4H_{10}	2803.57
C_5H_{10}	3310.40
C_5H_{12}	3462.57
C_6H_{14}	4102.21

3.6 Étude du cycle réel pour un fonctionnement de la Turbine à gaz de type STG 5-4000F de RAS DJINET :

3.6.1 Données recueillis : [1]

CHAPITRE 3 : Analyse énergétique et exergetique de la Turbine à gaz

Les données du constructeur :

Paramètres de l'air ambiant dans les conditions ISO :

Température de l'air ambiante	T=35°C = 308.15°K.
Pression atmosphérique	P=1.013 Bar
• Température ambiante	35 °C
• Humidité relative	76%
• Pression barométrique	1,013 Bar
• Fréquence	50 Hz
• Pouvoir calorifique inférieur PCI	45001.3 KJ/Kg

Conditions de référence pour la turbine à gaz sont listées ci-dessous

• Vitesse	3000 rpm
• Température ambiante	35 °C
• Pression barométrique	1013 mbar
• Humidité relative	76 %
• Perte de pression à l'entrée du compresseur (ISO) :	8 mbar
• Perte de pression à l'entrée de la turbine (ISO)	36,3 mbar
• Facteur de puissance nominal	0.9
• Pertes de puissance d'excitation nominale	0.8 MW

Données de conception Type - SGT5-4000F : [1]

Tableau 6 : Autres données du site. [1]

Carburant	Gaz	Huile
Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	45001 kJ/kg	43100 kJ/kg
Rendement nominal sur les bornes du générateur :	249.2 MW	210.5 MW
Efficacité nominale sur les bornes du générateur :	38.4 %	36.9 %
Débit du gaz d'échappement:	616.2 kg/s	610.9 kg/s
Température du gaz d'échappement :	607.6 °C	557.4 °C
Consommation de carburant	14.3 kg/s	13.2 kg/s

Le système d'admission d'air est conçu pour la turbine à gaz sgt5-4000f avec le débit massique, les températures et les pressions d'air correspondants et les niveaux sonores autorisés.

Le détail du système d'admission d'air est comme suite :

Débit d'air = 555 m³/sec

Température = 0°C à 45°C

Pression = 2200 à 3000 Pa

Puissance net en MW = 377.0 MW [1]

3.6.2 Procédure de calcul :

➤ Partie compression: [1] :

La température à l'entrée de compresseur : $T_1=308.15\text{K}$. / $T_1=35^\circ\text{C}$.

La température à la sortie de compresseur : 953, 88 K

La pression à la sortie de compresseur : $P_2=1.7225\text{e}+03$. En kPa.

L'altitude du site par rapport au niveau de la mer : $Z=00$ m.

A l'admission de la compression, le débit volumique de l'air est :

$Qv = 555 \text{ m}^3/\text{s}$. Ajoutant à ça un excès d'air de 420 %.

✚ Excès d'air : [6]

On parlera de « combustion en excès d'air » chaque fois que l'on détectera la présence d'oxygène dans les produits de combustion. L'excès d'air peut résulter soit d'un réglage du volet d'air au niveau du brûleur (*brûleur à air soufflé*), soit d'une impossibilité à régler l'arrivée d'air (*brûleur atmosphérique*). Cet excès d'air est indispensable pour une combustion complète

L'air en excès impliquera :

Une augmentation des pertes par les fumées,

Une diminution du rendement de la chaudière.

Ainsi cette augmentation entraînera un accroissement des dépenses énergétiques sur une saison de chauffe (consommation de combustible plus importante).

On caractérise l'air en excès par le *facteur d'air Fa* ou *taux d'aération n* en utilisant la relation suivante :

$$n = \frac{\text{Volume d'air réellement admis au brûleur}}{\text{Volume d'air théorique}}$$

Selon la documentation de la central [1] les pertes de pressions à l'aspiration sont :

$dp_{cc} = 0.8$ kPa perte de charge dans la chambre de combustion.

Rendement du compresseur : [4]

$$\eta_c = 1 - \left(0.06 + \frac{\tau_c - 1}{150}\right) \quad (3.56)$$

Sachant que :

$$H_2 = H_1 + (H_{2is} - H_1) / \eta_c \quad (3.57)$$

$$W_C = H_2 - H_1 \quad (3.58)$$

Calcul de masse volumique ainsi que le débit massique à l'aide de MATLAB et NST-REFPROP :

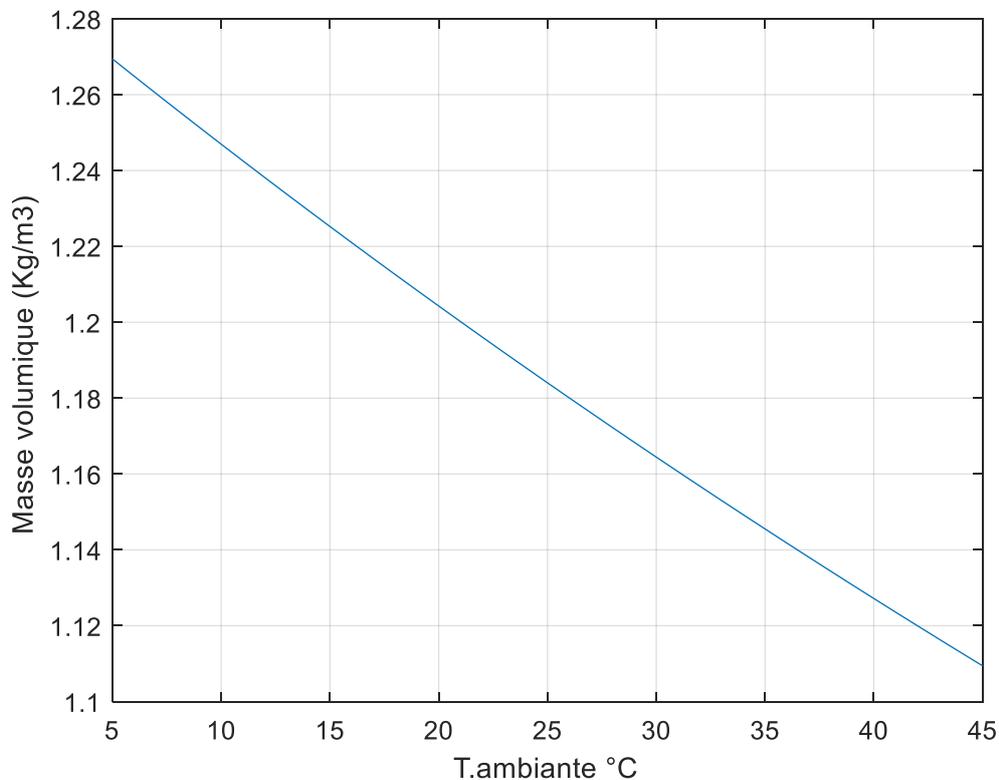


Figure 20 : Masse volumique d'air d'admission en fonction de température ambiante.

La figure 20 montre une variation de la masse volumique ρ de l'air avec une température ambiante qui varie à une pression 1atm. De cette illustration, on voit que la masse volumique est inversement proportionnelle à l'augmentation de la température ambiante. A titre d'exemple pour une augmentation de la température ambiante de 5 à 45 °C, la diminution de la masse volumique est environ de 22%.

$$\text{Débit massique } \left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right) = \rho \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right) \times \text{Débit volumique } \left(550 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) \quad (3.59)$$

Cette équation représente la relation entre le débit massique d'air d'admission et son débit volumique en fonction de ρ (masse volumique).

La figure 21 montre la variation du débit massique d'air d'admission dans le compresseur à une pression 1 atm avec une température ambiante qui varie. On remarque la diminution du débit massique d'air d'admission chaque fois la température ambiante augmente de 5°C jusqu'à atteindre 45°C, car la température ambiante influence sur la masse volumique d'air.

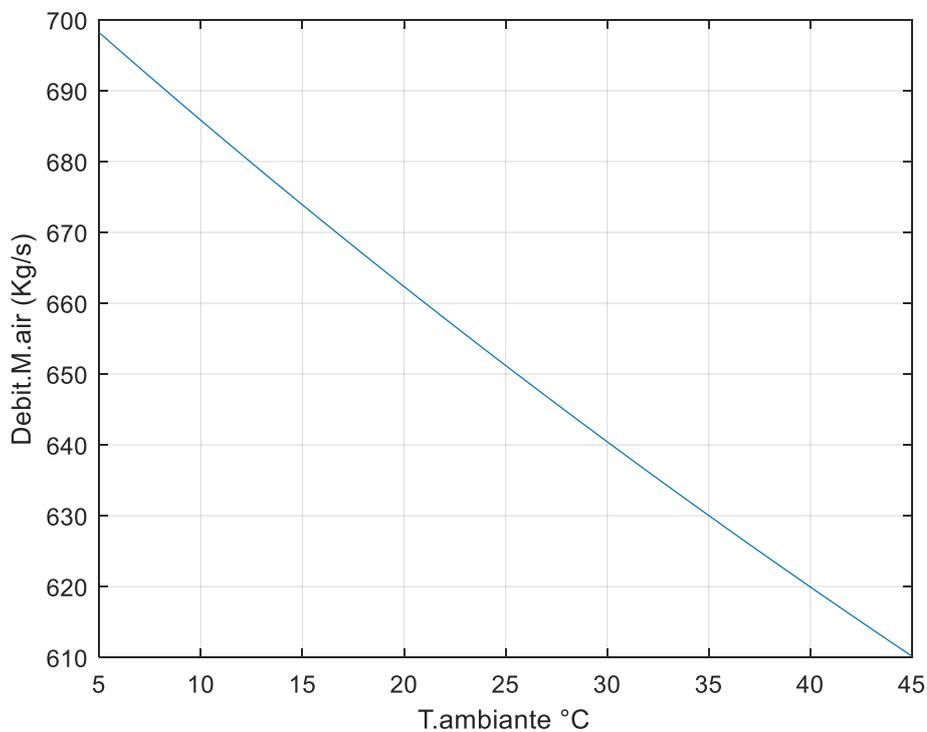


Figure 21 : Débit d'air d'admission en fonction de la température ambiante.

La figure 22 montre la variation de débit massique de l'air avec la masse volumique pour une pression de 1atm, on voit que l'augmentation du débit massique de l'air à chaque fois sa masse volumique s'agrandit sous forme d'une ligne droite, cette évolution est dû au changement de la température ambiante dans l'atmosphère.

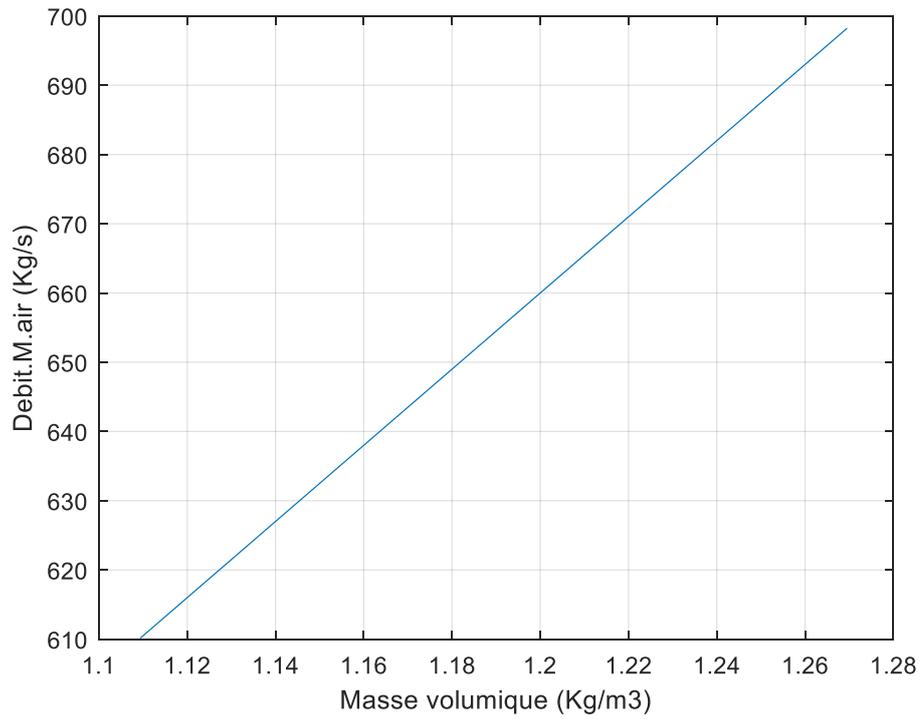


Figure 22 : Débit d'air d'admission en fonction de masse volumique de ce fluide.

➤ **Partie combustion :**

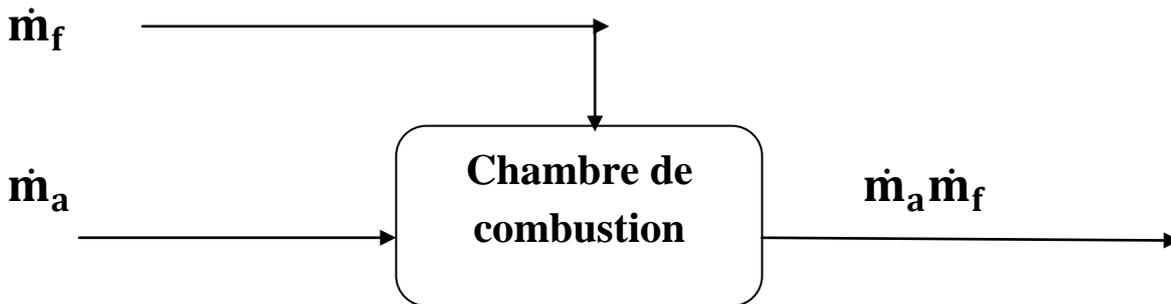


Figure 23: Bilan massique au sein de la chambre de combustion.

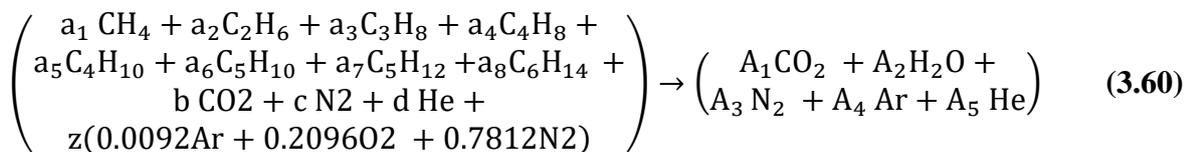
✚ Les caractéristiques du gaz naturel utilisé sont dans le tableau suivant :

Tableau 7 : Composition du gaz naturel avec différentes caractéristique. [1]

Composants	La composition chimique	% mol	P _c (bar)	T (°C)
Méthane	CH ₄	83.50%	45.992	190.56
Ethane	C ₂ H ₆	6.90%	48.718	305.33
Propane	C ₃ H ₈	2.10%	42.771	369.83
i-Butane	iC ₄ H ₈	0.35%	36.40	407.82
n-Butane	C ₄ H ₁₀	0.53%	37.96	425.13
i-Pentane	iC ₅ H ₁₀	0.11%	33.957	460.35
n-Pentane	C ₅ H ₁₂	0.12%	31.6	433.75
Hexane	C ₆ H ₁₄	0.14%	30.340	507.82
Nitrogène(Azote)	N ₂	5.85%	33.958	126.19
Dioxyde de Carbonne	CO ₂	0.21%	73.773	304.13
Hélium	He	0.19%	0.2274	5.1953

Equation de la combustion :

L'équation de combustion complète pour le gaz naturel :



Carbone produit :

$$A_1 = \sum_{1 \leq i \leq 8} a_i + b = 1.0932 \quad (3.61)$$

Avec b= 0.0021

Hydrogène produit:

$$A_2 = \left(\begin{array}{l} (a_1 4) + (a_2 6) + (a_3 8) + (a_4 8) + \\ (a_5 10) + (a_6 10) + (a_7 12) + (a_8 14) \end{array} \right) / 2 = 2.0240 \quad (3.62)$$

$$2A_1 + A_2 = 2b + 2z * 0.2096 \quad (3.63)$$

$$z = 4.2100$$

Azote produit :

$$A_3 = z * 0.7812 + c = 3.3468 \quad (3.64)$$

CHAPITRE 3 : Analyse énergétique et exergetique de la Turbine à gaz

Avec :

$$c = 0.0585 \text{ et } z = 4.2100 \text{ (calculé)} \quad (3.65)$$

Argon produit :

$$A_4 = z * 0.0092 = 0.0387 \quad (3.66)$$

Helium produit :

$$A_5 = 0.0019 \quad (3.67)$$

Tableau 8: Fractions molaires des produits dû à la combustion.

Elément	Fraction molaire
<i>CO2</i>	A1=2.0240
<i>H2</i>	A2=2.0240
<i>N2</i>	A3= 3.3468
<i>Ar</i>	A4=0.0387
<i>He</i>	A5=0.0019

Le tableau ci-dessous représente les enthalpies des réactive:

Tableau 9 : Enthalpies des produits dû à la combustion.

Réactifs	Enthalpies (KJ/Kg)
CO ₂	126.49×10 ⁴
H ₂ O	398.17×10 ⁴
N ₂	107.69×10 ⁴
Ar	52.073×10 ⁴
He	520.3×10 ⁴
L'enthalpie produite H3	1307.6×10 ⁴

✚ Dosage (FAR) : [8] C'est le rapport du débit massique du fuel injecté sur le débit massique d'air admis dans une période de temps précise.

$$\dot{m}_f h_f + \dot{m}_a h_2 + \dot{m}_f \text{ PCI} = (\dot{m}_f + \dot{m}_a) h_3 \quad (3.68)$$

$$\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} h_f + h_2 + \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \text{ PCI} = \left(1 + \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a}\right) h_3 \quad (3.69)$$

$$\text{FAR} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \quad (3.70)$$

$$\dot{m}_f = \text{FAR} * \dot{m}_a \quad (3.71)$$

$$\text{FAR} * (h_f + \text{PCI} - h_3) = h_3 - h_2 \quad (3.72)$$

$$FAR = \frac{h_3 - h_2}{h_f + PCI - h_3} \quad (3.73)$$

✚ Rendement de la chambre de combustion :

$$\eta_{cc} = \frac{Q_r}{m_c \times PCI} \quad (3.74)$$

$$\eta_{cc} = 0.97$$

$$Q_c = H_3 - H_2 \quad (3.75)$$

✚ Consommation spécifique : [4]

La consommation spécifique en fonction de la masse du fuel et de la puissance nette produite :

$$C_s = \frac{\dot{m}_f}{P_{nette}} \times 3600 \quad (3.76)$$

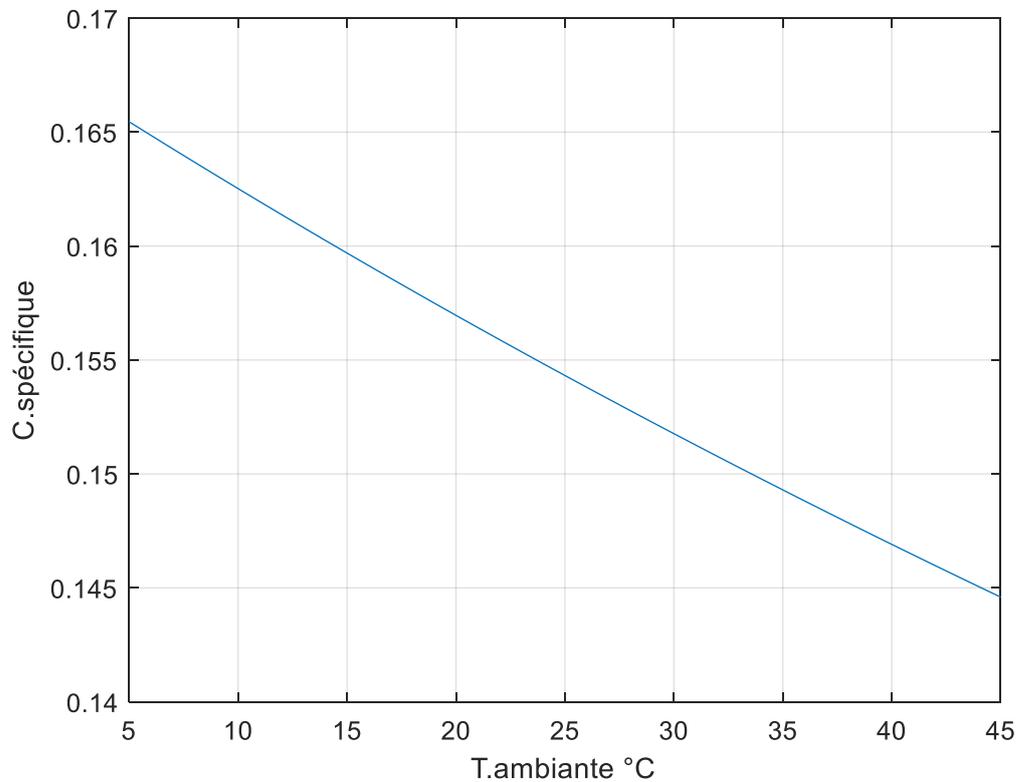


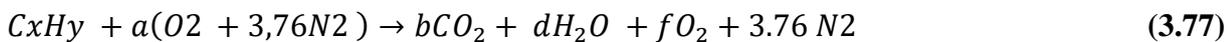
Figure 23 : Consommation spécifique en fonction de la température ambiante.

La figure 23, dans cette figure la consommation spécifique diminue sous forme d'une ligne courbée avec la température ambiante qui augmente de 5°C à 45°C, ça parce que le débit massique du fuel qui est lié au FAR, il varie au cours du changement de température ambiante.

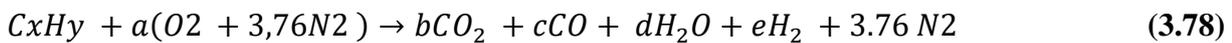
La richesse : [3]

La richesse Φ inverse du Coefficient d'air théorique λ L'équation de combustion complète d'un hydrocarbure avec excès d'air devient :

Avec : $\Phi = \frac{1}{\lambda} \Phi \leq 1$



Pour un manque d'air, une combustion incomplète on a : $\Phi \geq 1$



Le coefficient a représente le rapport de nombre de mole d'oxygène dans le nombre de mole de carburant :

$$a = \frac{x + \frac{y}{4}}{\Phi} \quad (3.79)$$

Les coefficients $c = 0, e = 0$ car il y'a excès d'air

$$b = x, c = 0, d = \frac{y}{2}, e = 0$$

D'où :

$$f = \left(\frac{1-\Phi}{\Phi}\right) \left(x + \frac{y}{4}\right) \quad (3.80)$$

Le totale du nombre de moles des produits :

$$N_{TOT} = x + \frac{y}{2} + \left(\frac{x + \frac{y}{4}}{\Phi}\right) (1 - \Phi + 3.76) \quad (3.81)$$

Pour Les fractions molaires (combustion complète)

$$X_{CO_2} = \frac{x}{N_{TOT}} \quad (3.82)$$

$$X_{CO} = 0 \quad (3.83)$$

CHAPITRE 3 : Analyse énergétique et exergetique de la Turbine à gaz

$$X_{H_2O} = \frac{\left(\frac{Y}{2}\right)}{N_{TOT}} \quad (3.84)$$

$$X_{H_2} = 0 \quad (3.85)$$

$$X_{O_2} = \left(\frac{1-\Phi}{\Phi}\right) \frac{\left(X+\frac{Y}{4}\right)}{N_{TOT}} \quad (3.86)$$

$$X_{N_2} = \frac{3.76\left(x+\frac{y}{4}\right)}{(\Phi N_{TOT})} \quad (3.87)$$

Partie turbine

Température du gaz à l'entrée de la turbine = 15 °c après sur chauffage 200 °C

✚ Rendement de la turbine : [5]

$$\eta_t = 1 - \left(0.05 + \frac{\tau_c - 1}{180}\right) \quad (3.88)$$

Sachant que :

$$H_{4is} = H_3$$

$$W_T = (H_3 - H_{4is}) \quad (3.89)$$

Perte de pression à l'entrée de la turbine : [7]

Selon la documentation du central [1]. Les pertes de pressions à l'entrée de la turbine l'aspiration sont :

Dpt = 3.63kPa perte de charge dans la chambre de combustion.

La puissance nette : [6]

$$\dot{w}_{\text{nette}} = \dot{w}_t - \dot{w}_c \quad (3.82)$$

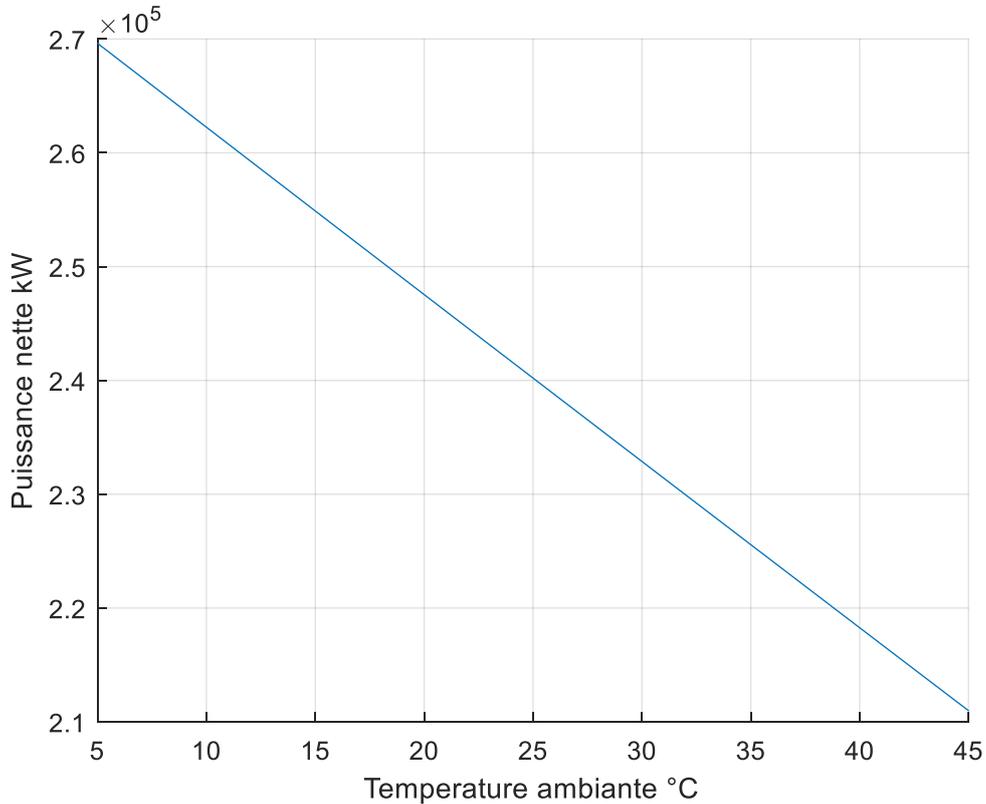


Figure 24 : puissance nette en fonction de la température ambiante

La figure 24 montre la variation de la puissance nette ($\dot{W}_t - \dot{W}_c$) en fonction de la température ambiante, on voit que la puissance nette ($\dot{W}_t - \dot{W}_c$) diminue de $(2.7 \text{ à } 2.1) \times 10^5$ KW chaque fois que la température ambiante augmente de 5°C à 45°C et ça sous forme d'une ligne droite, parce que les puissances du compresseur et de la turbine varient inversement.

La figure 25 montre la variation de la puissance nette ($\dot{W}_t - \dot{W}_c$) en fonction de la température à l'entrée de la turbine T3, on remarque que la puissance nette ($\dot{W}_t - \dot{W}_c$) augmente à partir (1.9×10^5) pour $T_3 = 900^\circ\text{K}$ chaque fois que la température à l'entrée de la turbine augmente et ça sous forme d'une ligne droite jusqu'à atteindre 6×10^5 KW ça parce que la puissance de la turbine \dot{W}_t grimpe.

CHAPITRE 3 : Analyse énergétique et exergétique de la Turbine à gaz

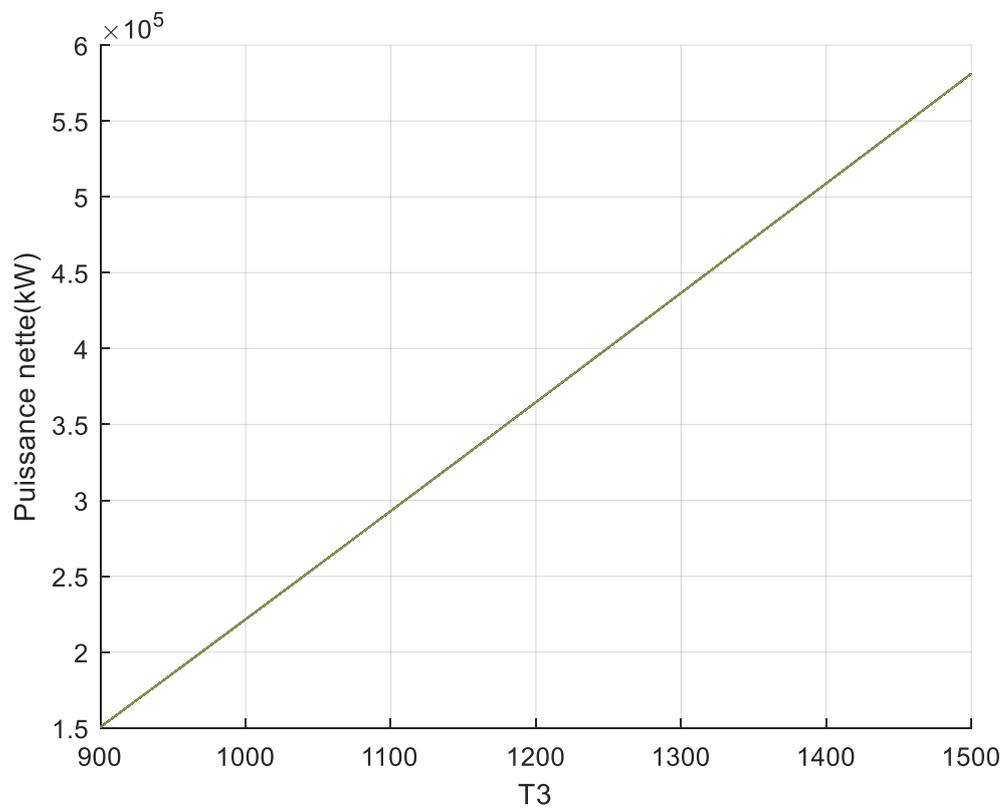


Figure 25 : puissance nette en fonction de température à l'entrée turbine.

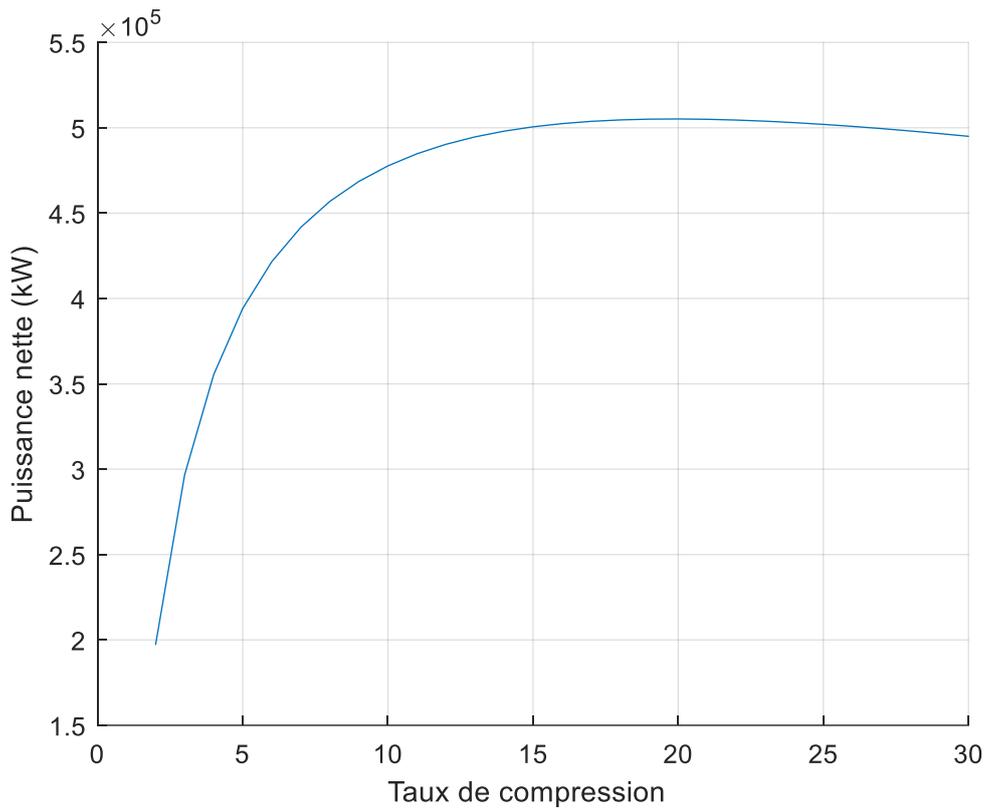


Figure 26 : puissance nette en fonction du taux de compression.

La figue 26 montre une augmentation de la puissance nette ($\dot{W}_t - \dot{W}_c$) au sein de la machine en fonction du taux de compression, on remarque que cette la puissance prend une évolution sous forme d'une courbe jusqu'à taux=17 ou la puissance nette égale approximativement 5.1×10^5 KW ou il commence à diminuer.

✚ Rapport W_c/W_t :

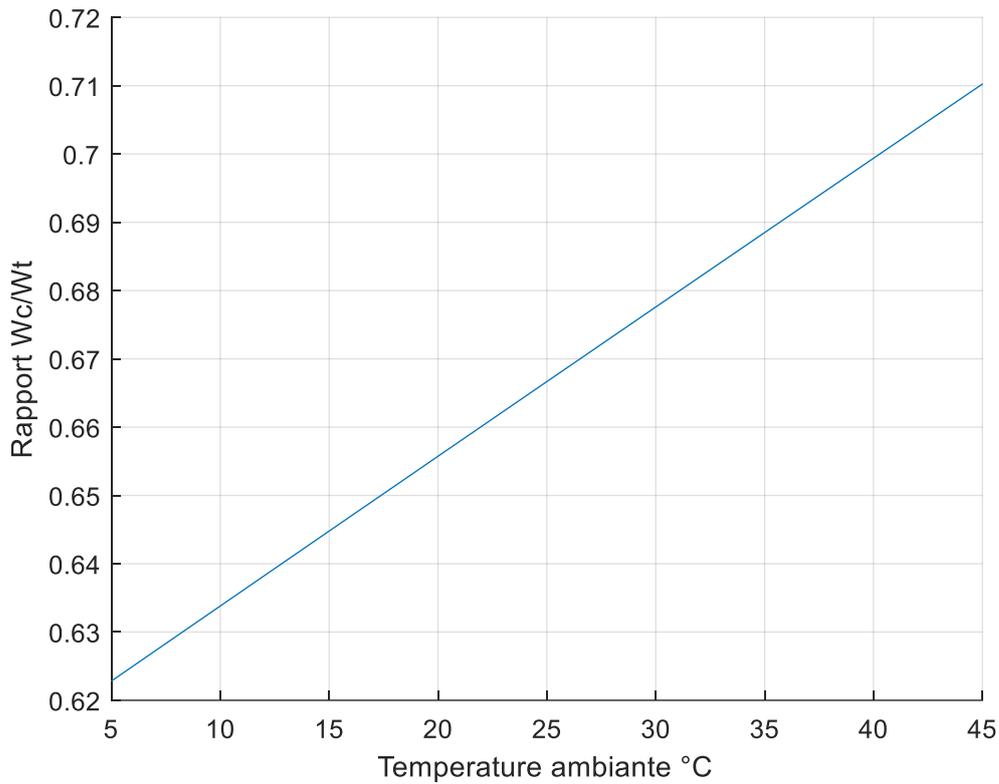


Figure 27 : Rapport (W_c/W_t) en fonction de la température ambiante.

La figure 27 montre l'évolution du rapport W_c/W_t en fonction de la température ambiante, on remarque une nette augmentation de ce rapport de 0.622 jusqu'à 0.71 sous forme d'une droite en variant la température ambiante de 5°C jusqu'à 45°C

La figure 28 montre le rapport W_c/W_t en fonction du taux de compression, on voit que le rapport augmente chaque fois que le taux de compression s'améliore de 2 jusqu'à atteindre 30 et ça sous forme d'une droite légèrement courbée.

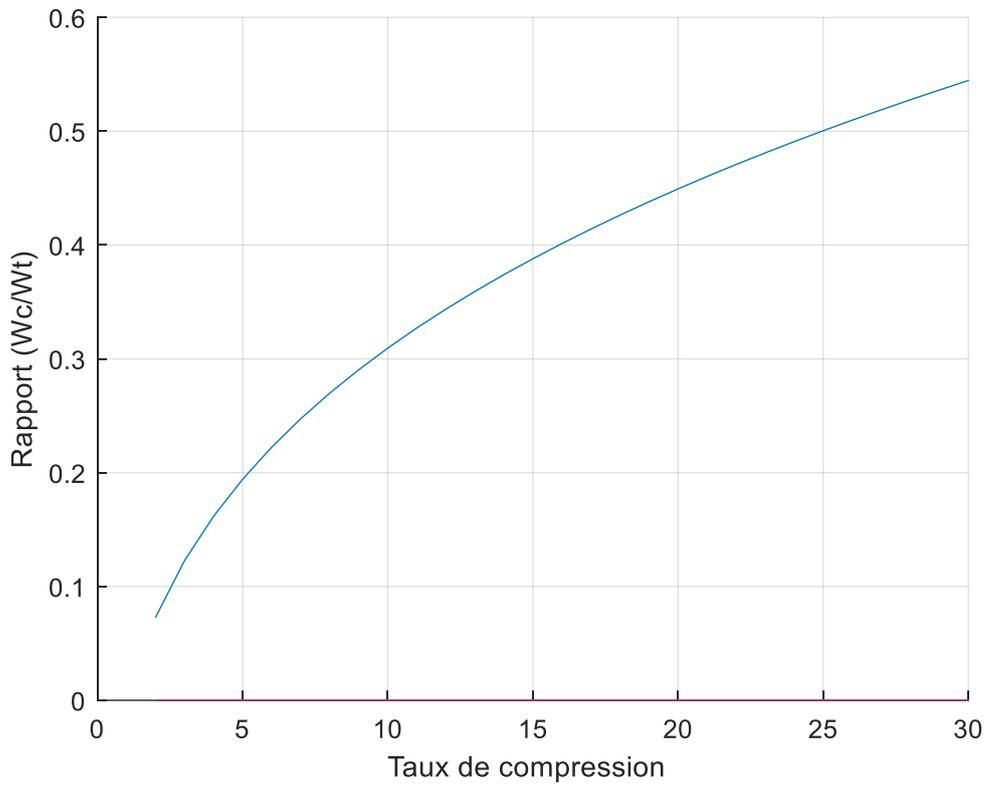


Figure 28 : Rapport (Wc/Wt) en du taux de compression.

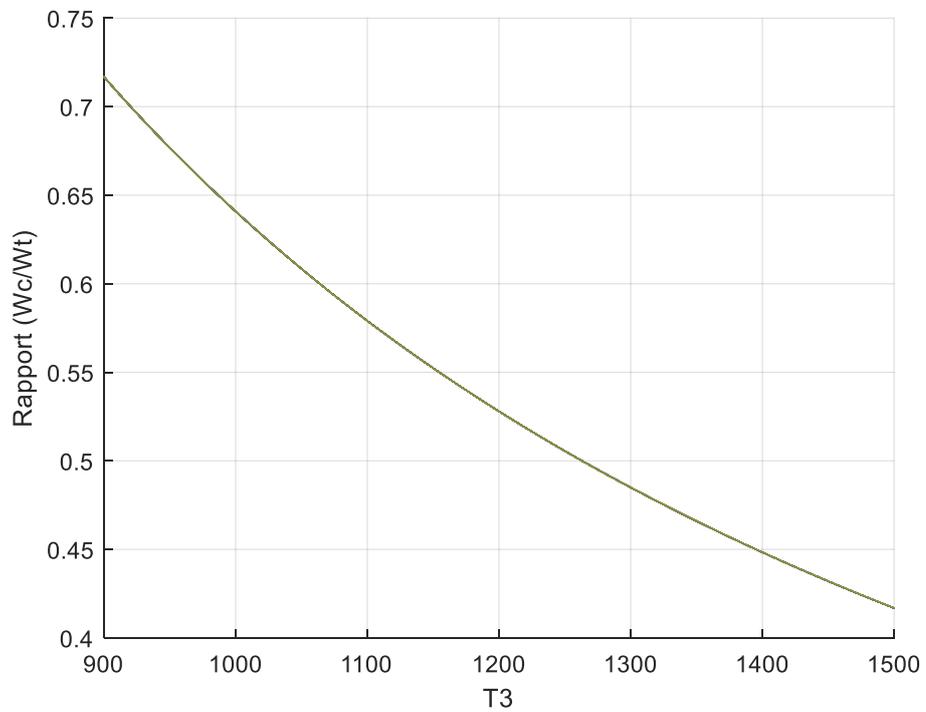


Figure 29 : Rapport (Wc/Wt) en fonction de la température à l'entrée turbine.

La figure 29 montre le rapport de W_c/W_t en fonction de la température à l'entrée turbine, on remarque une diminution du rapport en fonction de cette température qui augmente de 900°C jusqu'à 1500°C vu que le travail de la turbine augmente avec une température T_3 qui augmente aussi.

3.6.3 Etude paramétrique à l'aide de MATLAB et NST- REFPROP :

➤ Rendement global en fonction de la température ambiante :

La figure 30 montre la variation du rendement global de la turbine à gaz en fonction de la température ambiante pour une température entrée turbine de 1238.15°K et pour quatre valeurs de taux de compression (10, 17, 24, 30). De ce fait, on remarque que le rendement global est inversement proportionnel à la température ambiante. De plus, une augmentation de taux de compression cause une diminution de la performance de la turbine à gaz car le compresseur comprime excessivement de l'air.

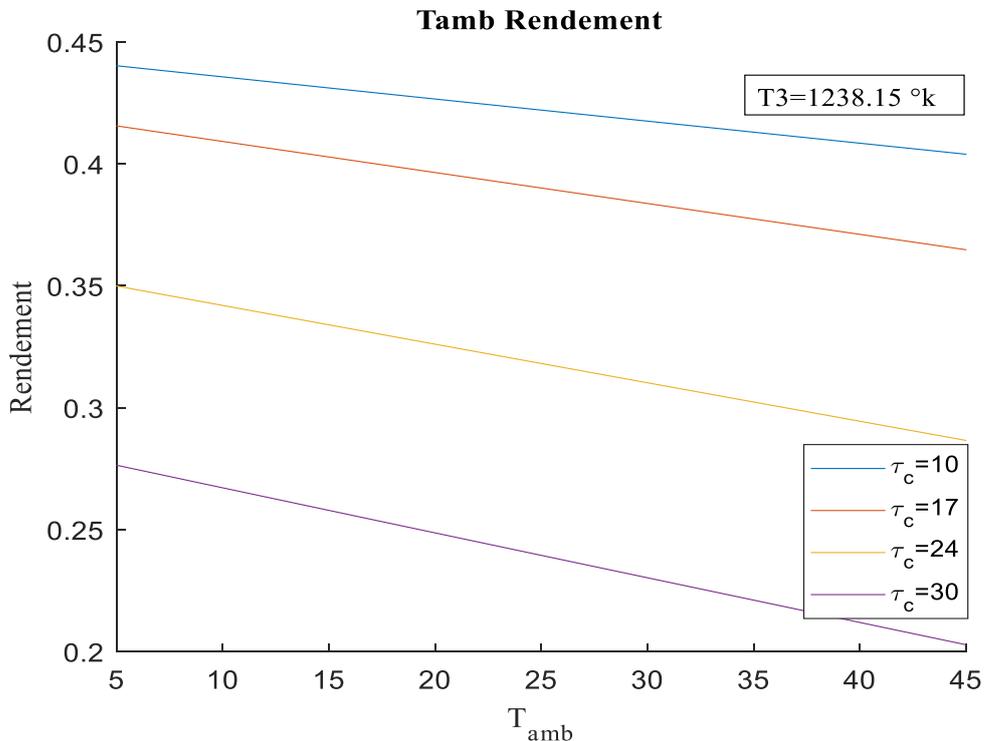


Figure 30 : Rendement Global en fonction de la température ambiante.

La figure 31 montre la variation du rendement global de la Turbine à gaz en fonction de la température ambiante pour un taux de compression égal à 17 et pour quatre valeurs de

température entrée turbine (900,965, 1000,1200). De ce fait, on remarque que le rendement global est inversement proportionnel à la température ambiante. De plus, une augmentation de la température entrée turbine cause une augmentation de la performance de la turbine à gaz car la puissance de la turbine augmente.

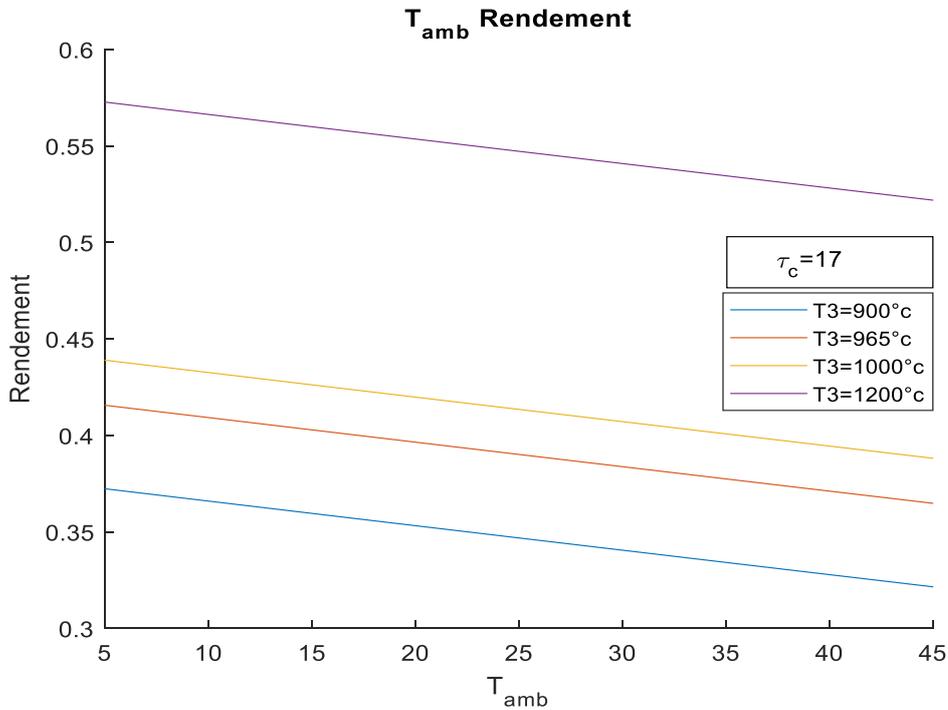


Figure 31 : Rendement Global en fonction la température ambiante.

➤ **Rendement global en fonction du taux de compression :**

La figure 32 montre la variation du rendement global de la turbine à gaz en fonction du taux de compression a quatre valeurs de la température ambiante (15, 25, 35, 45). On remarque une nette augmentation du rendement global jusqu'à sa valeur max précise qui caractérise chaque courbure ou il commence à diminuer. Ces températures ambiantes causent une différence dans l'évolution du rendement globale.

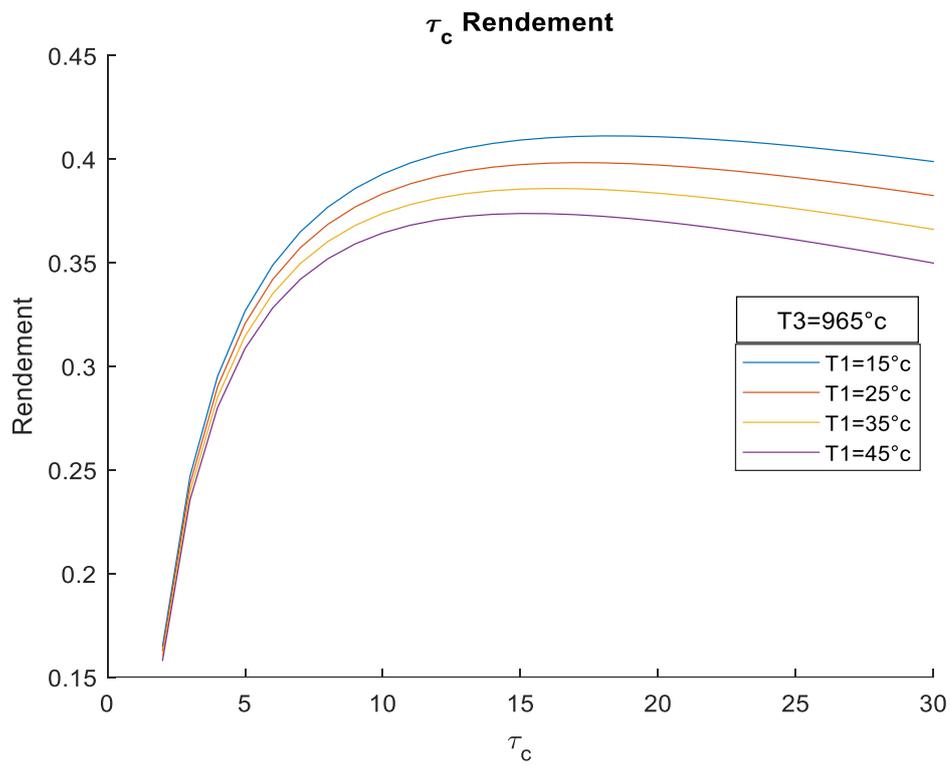


Figure 32 : Rendement Global en fonction du taux de compression .

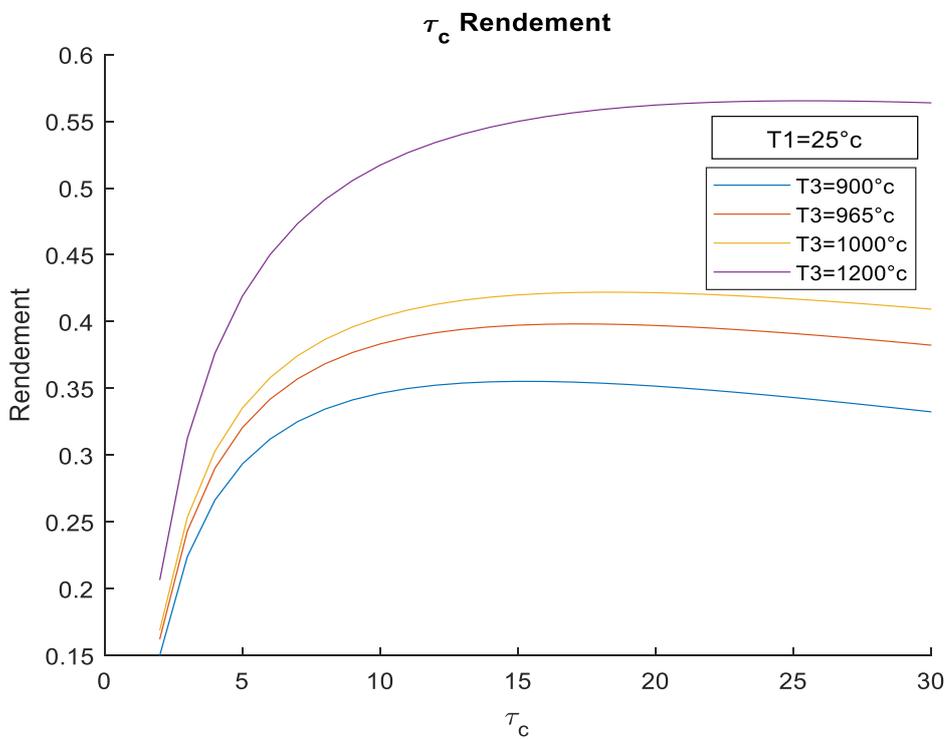


Figure 33 : Rendement Global en fonction du taux de compression .

La figure 33 montre une variation du rendement global de la turbine à gaz en fonction du taux de compression à quatre valeurs de la température à l'entrée de la turbine (900,965,1000,1200) ou ces température cause une différence dans l'évolution du rendement globale. On voit une nette augmentation du rendement global chaque fois le taux de compression augmente jusqu'à sa valeur max bien précise dans chacune des courbes ou il commence à diminuer et ça du à la quantité d'air comprimé.

➤ **Rendement global en fonction de la température entrée turbine :**

La figure 34 montre la variation du rendement global de la turbine à gaz en fonction de la température à l'entrée de la turbine à un taux de compression équivalent à 17 à quatre valeurs de la température ambiante. On voit une augmentation du rendement global chaque fois la température à l'entrée de la turbine augmente. De plus, l'évolution est influencée par la baisse de la température ambiante.

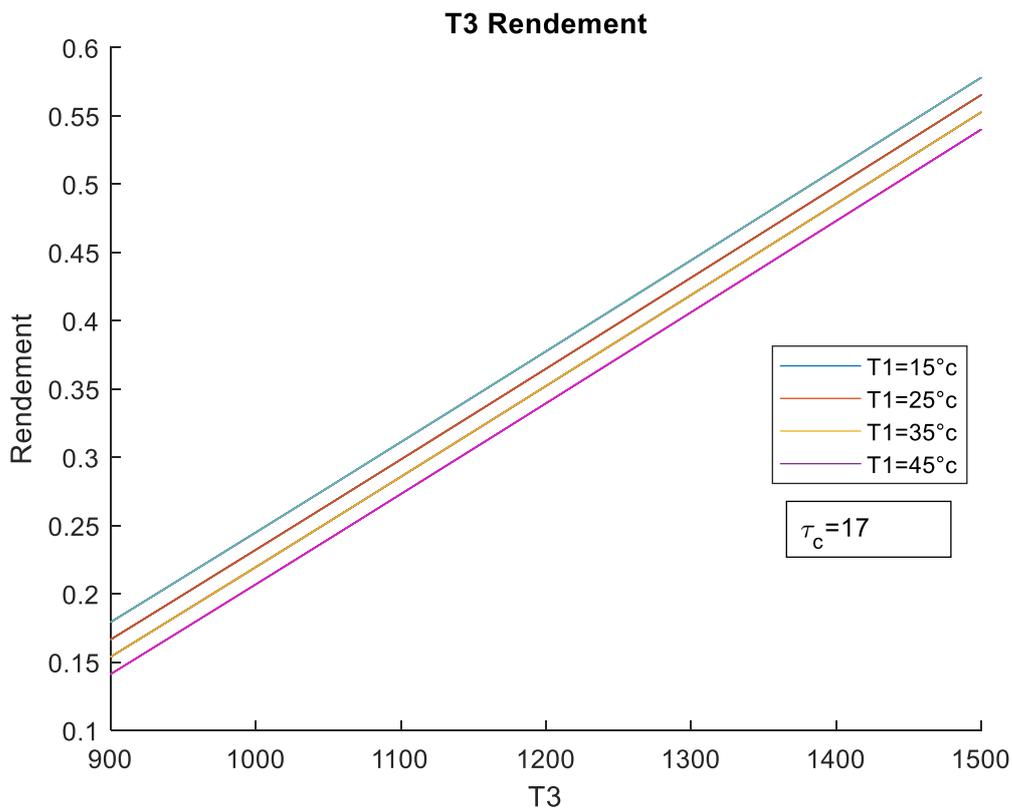


Figure 34 : Rendement Global en fonction de la température à l'entrée turbine

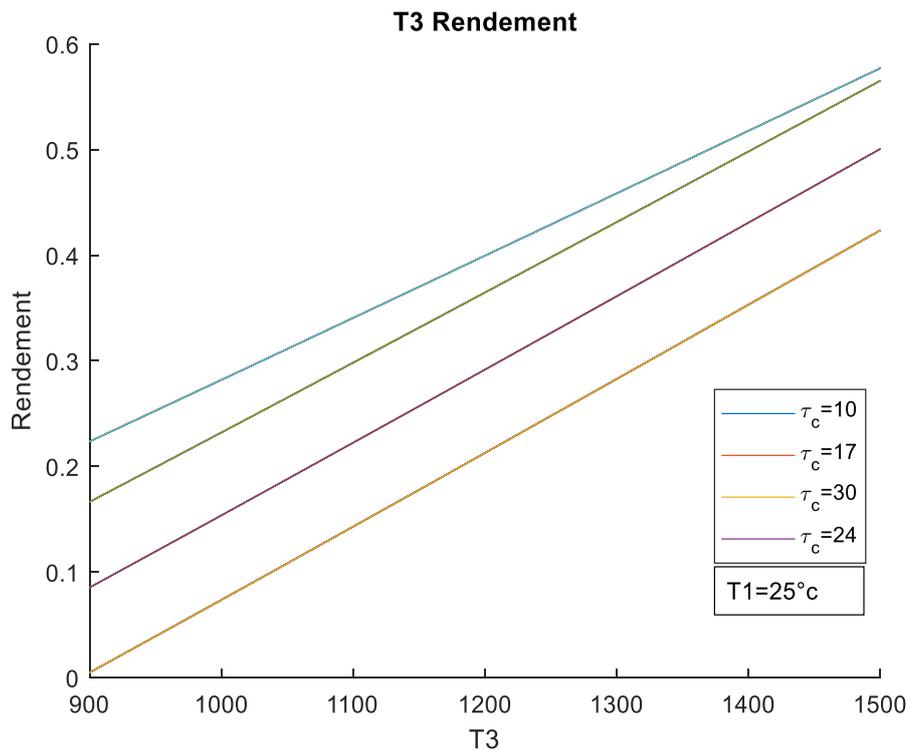


Figure 35 : Rendement Global en fonction de la température à l'entrée turbine

La figure 35 montre l'augmentation du rendement global de la turbine à gaz en fonction de la température à l'entrée de la turbine a une température ambiante fixe et a quatre valeurs du taux de compression. De ce fait, On remarque une augmentation du rendement global, chaque fois le taux de compression diminue les résultats. De plus, le rendement global augmente avec une faible croissance a $\tau_c=10$ par rapport aux autres.

Conclusion :

Dans ce chapitre, avec les données requises au niveau du site on est parvenu à établir une étude paramétrique qui calcule et détermine via MATLAB et NST-REFPROP la performance de cette Turbine à gaz (Rendement, Travail net, Rapport W_c/W_t ...) et ça en variant trois paramètres (τ_c, T_1, T_3).

Conclusion Général :

Les turbines à gaz sont des machines implantées un peu partout dans le monde afin de générer de l'électricité ou bien pour une utilité dans des industries pétrolières et ça aux services de l'humain et de ses différents besoins.

En effet, ce projet de fin d'étude nous a permis de comprendre énormément de choses sur le système de production électrique via un cycle combiné, et nous avons appris pas mal de détails sur la turbine à gaz et sur son cycle de fonctionnement en maîtrisant des logiciels tels que MATLAB et NST-REFPROP.

Par ailleurs, ce qui est à retenir de ce travail c'est que pour le système d'admission d'air dans le compresseur la température ambiante joue un rôle très important sur la variation de la masse volumique d'air qui entraîne une variation dans le débit massique. Aussi la température ambiante influence la consommation spécifique, la puissance nette et le rendement global de la machine. Sans oublier que ces deux derniers paramètres sont aussi influençables par le changement du taux de compression et de la température à l'entrée de la turbine.

Enfin, nous ne prétendons pas avoir résolu le problème posé dans son intégralité mais nous sommes convaincus que le travail élaboré n'est qu'une étape primaire aussi bien pour une carrière professionnelle que pour des études plus approfondies.

En conclusion, nous devons avouer que rétrospectivement nous sommes satisfaits de notre travail puis que nous avons atteint beaucoup d'objectif.

Références bibliographiques :

- [1] Documentation de la nouvelle centrale thermique de 'RAS-DJINET'.
- [2] Siemens Global Website [<https://new.siemens.com/global/en/products/energy/power-generation/gas-turbines.html>].
- [3] Ibrahim Dinçer_CalinZamfirescu. Advanced power generation systems. Elsevier Science. (2014).
- [4] Yousef SH Najjar, Fuel effect on vehicular gas engine turbine performance. Applied Thermal Engineering. [<https://www.journals.elsevier.com/applied-thermal-engineering>].Jeddah. (1988).
- [5] Yousef SH Nejjar.Performance of simple gas turbine engine in two mode of operation. Applied Thermal Engineering. JournalElsevier. makka (1992).
- [6] Yousef SH Nejjar: performances gas turbine analyses for combined system, Applied Thermal Engineering. Journal Elsevier. Jeddah (1996).
- [7] Yousef SH Nejjar: efficient use of energy by utilizing gas turbine combined systems, Applied Thermal Engineering, journal Elsevier,(2001).
- [8] D.G.Willson, the design of high-efficiency turbomachenery and gas turbines .the Mitt press, Cambridge .MA (1984).

Résumé

Le chapitre 1 traite l'emplacement géographique et décrit les différents composants de cette centrale.

Le chapitre 2 montre et explique les trois parties essentielles de la turbine à gaz qui sont : compresseur, chambre de combustion, turbine de détente. Avec leurs constructions et compositions ajoutant à cela le système de refroidissement de la turbine de détente ainsi sa mise en marche.

Le chapitre 3 présente les données requises du site concernant la turbine à gaz, des formules mathématiques, ainsi on a exposé les résultats calculés à partir des logiciels informatiques sous forme de tableaux et de figures numérotés.

Dans ce contexte pour résoudre la problématique on fait appel à un couplage de logiciels informatiques NST-REFPROP et MATLAB en utilisant des gaz réels de fonctionnement.