



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



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master académique en

Filière : **Industries Pétrochimiques**

Spécialité : **Génie du Raffinage**

Présentée par : **BENHASSAN Brahim et KEBOUR Djilali**

Thème

Turbine à gaz caractéristique et performance

Centrale de production Sonelgaz-Tiaret

Déposé le : 07/07/2021

Devant le Jury :

CHEMRAK Mohamed Amine	Président	M.C. B	Univ-Tissemsilt
TAIBI Mohamed	Encadreur	M.C.A.	Univ-Tissemsilt
MOKHTAR Djamila	Examinatrice	M.C.A.	Univ-Tissemsilt
BOUKANOUN Meriem	Examinatrice	M.C.A.	Univ-Tissemsilt

Année universitaire : 2020-2021

Résumé

La turbine à gaz fonctionne sur le principe de la compression et de la combustion de l'air et du gaz dans la chambre de combustion et en utilisant le jet d'échappement pour fournir la réaction nécessaire pour pousser le moteur vers l'avant et déplacer le ventilateur et produire une pression de l'air qui y pénètre pour faire fonctionner le moteur. La turbine se compose de trois éléments principaux : le compresseur et le turbo convertisseur reliés à un arbre commun. La combustion qui se produit entre le détenteur de la turbine et le compresseur utilise les deux tiers de l'énergie produite par la turbine pour lancer le compresseur.

La turbine à gaz ou moteur à turbine dépend de la combustion interne et est alimentée par ajout de gaz ou de liquides, et le terme turbine est généralement appliqué à tous les moteurs qui contiennent un compresseur, une chambre de combustion et une turbine, tandis que la turbine à gaz est principalement utilisée comme aéronef. Moteurs, et est utilisé dans d'autres domaines tels que les turbines à eau. Ou hydraulique utilisé pour faire fonctionner les générateurs électriques dans les centrales hydroélectriques, et les plus courants de ces moteurs sont la roue de turbine, la turbine Francis, la turbine Kaplan et la turbine à vapeur, qui étaient une source majeure pour faire fonctionner les gros générateurs d'électricité qui étaient présents dans la plupart des grands navires.

The gas turbine works on the principle of compressing and burning air and gas in the combustion chamber and using the exhaust jet to provide the feedback needed to push the engine forward and move the fan and produce pressure from the air entering it to operate the engine. The turbine consists of three main components: the compressor and the turbo converter connected to a common shaft. The combustion that occurs between the expander of the turbine and the compressor uses two-thirds of the energy produced by the turbine to start the compressor.

The gas turbine or turbine engine depends on internal combustion and is powered by adding gases or liquids, and the term turbine is generally applied to all engines that contain a compressor, combustion chamber, and turbine, while the gas turbine is mainly used as an aircraft. motors, and is used in other fields such as water turbines. or hydraulic used to operate electric generators in hydroelectric power plants, and the most common of these motors are turbine wheel, Francis turbine, turbine Kaplan and

the steam turbine that was used at the end of the 19th century, which was a major source to operate the large generators of electricity that were present in most large ships.

يعمل التوربين الغازي على مبدأ ضغط وحرق الهواء والغاز في حجرة الإحتراق واستخدام عادم النفاث لتوفير التفاعل اللازم لدفع المحرك إلى الأمام وتحريك المروحة وإنتاج الضغط من الهواء الداخل إليه لتشغيل المحرك بأقصى السرعات، يتكون التوربين من ثلاثة عناصر رئيسية هي: الضاغط والمحول التوربيني المتصلان بعمود مشترك، والإحتراق الذي يحدث بين موسع التوربين ويعتمد التوربين الغازي أو محرك التوربين على الإحتراق. والضاغط الذي يُستخدم لتوليد الطاقة التي ينتجها التوربين لإطلاق الضاغط داخلياً فيه ويشغل عن طريق إضافة الغاز أو السوائل، ويطلق مصطلح التوربين بشكل عام على كل المحركات التي تحتوي على ضاغط وغرفة إحتراق وتوربين، أمّا التوربين الغازي يستخدم بشكل رئيسي كمحركات للطائرات، ويستخدم في مجالات أخرى مثل التوربينات المائية أو الهيدرولوكية المستخدمة لتشغيل المولدات الكهربائية في المحطات الكهرومائية، ومن أكثر هذه المحركات شيوعاً هي عجلة التوربين، والتوربينات فرانسيس، وتوربين كابلان، والتوربينات البخارية التي استخدمت في نهاية القرن التاسع عشر والتي كانت مصدراً رئيسياً لتشغيل مولدات الكهرباء الكبيرة التي كانت موجودة في معظم السفن الكبيرة.

Dédicace

A nos très chers parents, sources inépuisables d'amour et de tendresse, en

reconnaissance des sacrifices consentis avec dévouement pour notre éducation et notre formation.

A nos chers frères et nos soeurs qui par leurs présences nous ont aidé à surmonter les épreuves difficiles, et à leurs familles.

A mon cher binôme pour le frère agréable qu'il était et qu'il restera pour moi.

A ma deuxième famille, la promotion 2021.

تشكرات

نشكر أولا وأخيرا الله تعالى الذي أسبغ علينا نعمه ظاهرة وباطنة، وأمدنا بالصبر لتذلل الصعوبات أمامنا وأعاننا على إنجاز هذه المذكرة، ثم أشكر أستاذي الكريم الدكتور طيبي محمد الذي قبل الإشراف على مذكرتنا وساعدنا خطوة بخطوة لبلوغ نهاية البحث. وأشكر كل من ساهم وبذل جهدا ولو بالقليل في إنجاز هذه المذكرة، كما أشكر الأساتذة الكرام أعضاء لجنة المناقشة على تفضلهم بقبول المناقشة

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Comparaison entre turbine à gaz	43
Tableau II.2 : Comparaison entre turbine à gaz et turbine à vapeur	44
Tableau III.1 : La turbine (T 9E)	80
Tableau III.2: La turbine (M 9E)	81
Tableau III.3: Section compresseur.....	81
Tableau III.4: Section combustion.....	81
Tableau III.5: Section turbine	82
Tableau III.6: Paliers.....	82
Tableau III.7: Disposition de démarrage	82
Tableau III.8: Système de combustible	82
Tableau III.9: Système de lubrification	82
Tableau III.10: Alimentation huile H.P:	83
Tableau III.11: Système d'eau de refroidissement	83

Liste des figures

Figure I.1: Classification des pompe	6
Figure I.2: Les intervalles d'utilisation des pompes.....	6
Figure I.3: Les pompes volumétriques.....	7
Figure I.4: les pompes volumétriques alternatives	7
Figure I.5: pompe à vis	7
Figure I.6: Pompe à engrenages a denture droite.....	8
Figure I.7 : Pompes à rotor hélicoïdal excentré	8
Figure I.8 : Pompe à palettes libres.....	9
Figure I.9: Pompe à palettes flexibles.....	10
Figure I.10: Pompe à lobes	11
Figure I.11: Pompe à pistons plongeurs.....	11
Figure I.12: Pompe à pompe membranes	12
Figure I13 : Pompe centrifuge	13
Figure I.14: Types d'un plusieurs des pompes centrifuges.....	13
Figure I.15: La turbine à gaz.....	14
Figure I.16: la turbine à vapeur.....	15
Figure I.17: Classification des compresseurs.....	17
Figure II.1:Vue en coupe de la zone de la compression	32
Figure II.2: Brûleurs de combustible	33
Figure II.3: Turbines à vapeur	37
Figure II .4 : la turbine à vapeur	38
Figure II.5 : Rotor d'une turbine à vapeur	39

Figure II.6: turbine à vapeur à réaction.....	41
Figure III.1: Schéma d'une turbine à gaz mono-arbre.....	49
Figure III.2: Schéma d'une turbine à gaz bi-arbre.....	50
Figure III.3: Schéma d'une turbine à action et à réaction.....	51
Figure III.4 : Présentation de la turbine à gaz.....	55
Figure III.5: La variation de pression et température dans une turbine à gaz.....	56
Figure III.6: Principaux composants de la turbine.....	58
Figure III.7: Schéma des sections de la turbine à gaz.....	58
Figure III.8: Section admission d'une turbine.....	59
Figure III.9: Vue en coupe de la zone de la compression.....	60
Figure III.10: Turbines HP & BP.....	60
Figure III.11: Enveloppe externe de la chambre de combustion.....	63
Figure III.12: type de système de combustion DLE.....	64
Figure III.13: Caisse turbine du compresseur (HP).....	65
Figure III.14: Rotors HP, BP.....	66
Figure III.15: Disposition caisse échappement et paliers.....	67
Figure III.16 : Système de démarrage hydrostatique.....	67
Figure III.17: Schéma de système de lubrification.....	68
Figure III.18: Système d'air de refroidissement et d'étanchéité.....	70
Figure III.19: turbin à gaz simple.....	71
Figure III.20 : turbine.....	12
Figure III.21 : Synoptique de turbine à gaz dans Thermoptim.....	73
Figure III.22: Schéma d'une turbine à gaz à deux arbres.....	74
Figure III.23 : Variantes du cycle thermodynamique de base.....	75
Figure III.24: Cycle de turbine à gaz à régénération.....	76
Figure III.25: Cycle de turbine à gaz à compression fractionnée.....	77
Figure III.26: cycles de turbine à gaz (Tiaret).....	79

Liste des nomenclatures

Symbole	Unité	signification
P	bar	Pression
T	K	Température réelle
Cp	$J.kg^{-1}.k^{-1}$	La chaleur spécifique de l'air
r	/	Taux de compression
η_c	/	Efficacité isentropique du compresseur
η_{comb}	/	Efficacité de la chambre de combustion
η_t	/	Efficacité isentropique de la turbine
η_m	/	Efficacité de transmission mécanique
Δp	%	Perte de pression a la combustion
Pt	MW	La puissance de la turbine
m_a	kg/s	Débit massique de l'air
CP_m	$J.kg^{-1}.k^{-1}$	La chaleur spécifique moyen
Mair	Kg/Kmole.	La masse moléculaire de l'air
Wcomp	KJ/KG	Le travail du compresseur

ρ	kg/m ³	masse volumique
Q_v	m ³ /hr	le débit volumique
X_{ij}	/	la composition du constituant i dans la source j
X_{it}	/	la composition totale du constituant i.
q'	tn/an	la quantité de combustible a gagné pour chauffe l'huile
W_t	KJ/KG	Le travail de la turbine
P_c	KJ	La puissance du compresseur
Q_h	KJ/KG	La quantité de chaleur dégagée dans la chambre de combustion
r'	/	Le rapport entre (pression d'entrée p3 et pression de sortie p4)
W_u	KJ/KG	Le travail utile
PCI	Kj/Nm ³	Pouvoir calorifique de chaque constituant
\dot{m}_{fuel}	kg/hr	Le débit de fuel gaz consommé
\dot{m}_{air}	Kg/hr	Le débit d'air utilisé

Résumé	
abstract	
ملخص	
remerciement	
dédicace	
table des matières	
liste des figures	
liste des tableaux	
liste de nomenclature	
Introduction Générale	1
Chapitre I Machines Tournantes, Pompe Compresseur, Et La Turbin	
Introduction	4
I.1.Théorie des machines tournantes	4
I.2. Les pompes	4
I.2.1. Classification des pompes	5
I.2.1. 1. Les pompes volumétriques	6
1-Pompes rotatives	7
B-Pompes à engrenages	8
C-Pompes à palettes:	9
D-Pompes à Lobes	10
2- Pompes volumétriques alternatives (à pistons plongeurs, à membranes)	10
A-A pistons plongeurs	10
I.2.1. 2. Les pompes roto-dynamiques	12
I.3. Les Turbines	14
I.3. 1-La turbine à gaz	14
I.3. 2-La turbine à vapeur	15
I.4. Compresseur:	15
I.4.1- Définition des compresseurs	15
I.4.2-Choisir un compresseur performant	17
I.4.3-Les compresseurs alternatifs a pistons	18
I.5- La Machine Tournante Ou La Conversion Electromagnétique	18
1 -Principes	18
2 -Conversion d'Energie	19
3-Fonctionnement Moteur	19
4-Fonctionnement Génératrice:	19

5-Expressions des Puissances	20
.....	
6-Conversion.....	21
7-Constitution/Fonctionnement	21
CHPITREII : Les turbines	
II.1.Les Turbins.....	23
.....	
II.1.1. Les turbines à gaz	26
II.1.1.1. Généralités sur les turbines à gaz	26
II.1.1.2. Classification des turbines à gaz.....	27
1. Par le mode de construction.....	27
2.Par le mode de travail.....	27
3. Par le mode de fonctionnement thermodynamique	27
II.1.1.3. Principales applications	28
1. Utilisation des turbines à gaz pour la propulsion	28
2.Production combinée chaleur-force	28
3.Production d'électricité	28
II.1.1.4. Présentations du sujet	29
II.1.1.5. Présentation de la turbine à gaz	29
II.1.1.6. Principe de fonctionnement	30
.....	
II.1.1.7. Caractéristiques de la turbine à gaz.....	30
II.1.1.8. Principaux composants de la turbine	31
A. Section admission	31
B. Section de compression	31
C. Section de combustion	32
D. Section turbine (détente)	33
E. Section échappement	34
II.1.1.8. Système-de-démarrage	34
II.1.1.9. Système de lubrification et graissage d'huile	34
II.1.1.10. Système d'air de refroidissement et d'étanchéité.....	35
II.1.2. Turbines à vapeur.....	36
II.1.2.1. Définition	36
II.1.2.2. Historique des turbines à vapeur	37

II.1.2.3. Principe d'une turbine à vapeur.....	38
II.1.2.4. Utilisation des turbines à vapeur dans l'industrie	39
II.1.2.5. Spécification des turbines nucléaires	40
II.1.2.6. Réalisation de turbine à vapeur.....	40
II.1.2.7. Classification des turbines à vapeur.....	41
1. selon l'utilisation	41
2. Selon la forme de la veine de vapeur	41
3. Par le nombre d'étages de rotor	42
4. Par le mode d'action	42
5. selon le mode de construction	42
II.1.3. Comparaison avec la turbine à gaz	42
1-Comparaison de point de vue thermodynamique.....	42
2. Comparaison de point de vue technologique.....	43
Introduction	47
III.1. La turbine à gaz	47
III .1.1. Définition.....	47
III.1.2. Classification des turbines à gaz	48
III.1.2. 1. Par le mode de construction	48
A. Turbine mono-arbre	48
B. Turbine bi-arbre	49
III.1.2. 2. Par le mode de travail.....	50
III.1.2.3. Par le mode de fonctionnement thermodynamique	51
III.1.3 Principe d'application.....	52
III.1.3.1. Utilisation des turbines à gaz pour la propulsion.....	53
III.1.3.2. Production combinée chaleur-force.....	53
III.1.3.3. Production d'électricité.....	53
III.1.4. Présentations du sujet	53
III.1.4.1. Présentation de la turbine à gaz.....	54
III.1.4.2. Principe de fonctionnement.....	55
III.1.4.3. Caractéristiques de la turbine à gaz	57
III.1.4.4. Principaux composants de la turbine.....	57
A. Section admission	59
B. Section de compression	59
C. Section de combustion	61

D. Section turbine (détente)	63
.....	
E. Section échappement.....	65
II.1.4.5. Système-de-démarrage	65
III.1.4.5. Système de lubrification et graissage d'huile.....	66
III.1.4.6. Système d'air de refroidissement et d'étanchéité	67
III.1.5. Généralité sur la turbine à gaz.....	69
1-Turbines à gaz.....	69
2-Modélisation d'une turbine à gaz avec Thermooptim.....	70
a-Turbine à gaz simpl.....	70
b-Turbine à gaz à deux arbres.....	71
c-Variantes du cycle thermodynamique de base.....	72
d-Turbine à gaz à régénération.....	73
e-Turbine à gaz à compression et détente fractionnées.....	73
3-Analyse fonctionnelle.....	75
4-cycles de turbine à gaz.....	76
III.1.6. caractéristiques de l'équipement.....	77
III.1.6.1. Caractéristiques de la turbine	77
III.1.6.2. Caractéristiques de l'équipement de la turbine à Gaz.....	78
Conclusion.....	68
conclusion générale	82
références bibliographiques	84

Introduction

Générale

Introduction Générale

La turbine à gaz a connu ces dernières années un développement considérable dans de nombreuses applications industrielles des hydrocarbures, et en particulier dans le domaine du transport du gaz et de production d'électricité, où conçue avec deux lignes d'arbres et accouplée à un compresseur centrifuge, elle offre une grande souplesse d'exploitation. L'évolution de la machine et son succès ont été conditionnés par l'amélioration des performances techniques des turbines et des compresseurs.

Les caractéristiques des turbines à gaz (taux de compression, débit, puissance...etc.), Ce qui nous mène à étudier l'influence des différents facteurs qui peuvent engendrer des problèmes lors du fonctionnement de la turbine.

La turbine à gaz est une machine thermique à flux continu, réalisant différentes transformations thermodynamiques, dans une succession d'organes comportant un compresseur et une turbine couplée mécaniquement sur un arbre, et une chambre de combustion intercalée entre ces deux derniers, ce qui permet de produire, de l'énergie contenue dans le combustible, une énergie mécanique utilisable sur l'arbre de la turbine, il aspire donc de l'air ambiant et rejette des gaz brûlés à l'atmosphère.

La demande d'énergie ne cesse de croître, alors que les ressources deviennent chères, il est donc nécessaire d'améliorer les performances techniques des turbines et évoluer leur rendement thermique de manière à réguler les coûts d'investissement, la pression et le débit sont les paramètres les plus influés sur ces performances et ce rendement et comme la turbine à un seul arbre, tourne à une vitesse constante et entraîne donc une charge stable (générateur) avec un rendement fiable, ne peut pas entraîner des charges variables (compresseur centrifuge). Les derniers développements des alliages entrés dans la fabrication des métaux des turbines n'ont pas pu résister avec la température d'allumage dans la turbine qui peut atteindre 1370°C , d'où vient la conception d'une turbine à deux arbres et avec des aubes variables entre les deux roues de la turbine et devient une solution pour répondre aux charges variables d'une part et contrôler la vitesse de compresseur axial (l'arbre HP) et contrôler la température d'autre part.

Le groupe thermique turbine à gaz est constitué par une turbine à gaz "à un seul arbre", en simple cycle, entraînant un alternateur.

La turbine à gaz du type décrit comporte un dispositif de démarrage à moteur de lancement, des auxiliaires, et une turbine à trois étages.

Dans la turbine à gaz, la combustion d'un mélange air-combustible est utilisée pour produire la puissance sur l'arbre nécessaire à l'entraînement du compresseur, de certains auxiliaires, et, principalement de l'alternateur.

Le rotor du compresseur axial et celui de la turbine sont assemblés par bride, et l'ensemble ainsi constitué repose sur trois paliers.

Au démarrage, le moteur de lancement transmet son couple à la ligne d'arbre turbine à travers un convertisseur de couple et le réducteur des auxiliaires qui, comme son nom l'indique entraîne un certain nombre d'auxiliaires (pompes par exemple).

CHAPITRE I
MACHINES TOURNANTES, POMPE
COMPRESSEUR, ET LA TURBINE

Introduction

I.1. Théorie des machines tournantes

La théorie des machines tournantes considère essentiellement les vibrations engendrées par des [arbres](#) supportés par des roulements ou [paliers](#) et affectés par divers effets parasites¹. Ces vibrations dépendent de la structure du mécanisme. Tout défaut de construction ou d'assemblage est susceptible d'aggraver ces [vibrations](#) ou d'altérer leur [signature](#) (comme on le voit dans les instabilités de certaines [turbomachines](#)). Les vibrations provoquées par un déséquilibre sont l'un des principaux sujets de la théorie des machines tournantes : elles doivent être prises en compte dès la phase de conception.

Lorsque la vitesse de rotation augmente, l'amplitude de vibration passe généralement par un maximum, qui caractérise la « pulsation critique. » Il existe en fait souvent plusieurs vitesses critiques successives, entre lesquelles l'amplitude des vibrations est beaucoup plus faible. Cette amplification provient fréquemment d'un déséquilibre des masses en rotation : cela se manifeste quotidiennement par la pratique de l'[équilibre](#) des moteurs et des [roues](#). L'amplitude critique peut avoir des conséquences catastrophiques.

Toutes les machines comportant des axes motorisés présentent une [fréquence fondamentale](#) de vibration, qui dépend de la répartition des masses en mouvement. La pulsation critique d'une machine tournante peut être interprétée comme la pulsation qui excite cette fréquence.

Pour limiter les effets du [couplage](#) de [résonance](#), il est essentiel de répartir les masses de façon à éliminer les réactions transverses sur les arbres, et par là, les forces parasites. Lorsque la vitesse excite des vibrations de [résonance](#), il se développe des efforts susceptibles d'entraîner la ruine du mécanisme. Afin d'éviter ce phénomène, on peut : ou bien éviter les vitesses critiques de rotation, ou les passer rapidement en phase d'accélération ou de freinage. Faute de prendre ces précautions, on risque de ruiner la machine, de favoriser l'usure ou la ruine des composants, de provoquer un dommage irréparable, voire un accident de personnes[1].

I.2. Les pompes

Les pompes sont des machines permettant un transfert d'énergie entre un dispositif mécanique convenable et le liquide. Suivant les conditions d'utilisation, ces machines communiquent au fluide soit principalement de l'énergie potentielle par accroissement de la pression en aval, soit principalement de l'énergie cinétique par la mise en mouvement du fluide. Sur le plan pratique la pompe est une machine réceptrice (reçoit du travail moteur) qui sert à élever les liquides ou les mélanges de liquides d'un niveau inférieur à un niveau supérieur, ou refouler les liquides d'une région à faible pression vers une région à haute pression.

La pompe est destinée à élever la charge du liquide pompé.

La charge ou l'énergie est la somme de trois catégories d'énergie :

- ✓ Energies cinétique.
- ✓ Energies potential.
- ✓ Energies de la pression.

C'est donc un appareil génère une différence de pression entre l'entrée et la sortie de la machine. L'énergie requise pour faire fonctionner une pompe dépend :

- ✓ Des propriétés du fluide : la masse volumique, la viscosité dynamique,
- ✓ Des caractéristiques de l'écoulement : la pression, la vitesse, le débit volume, la hauteur,
- ✓ Des caractéristiques de l'installation : la longueur des conduites, le diamètre et la rugosité absolue [2].

I.2.1. Classification des pompes

Il existe différentes pompes qui peuvent se classer en deux grandes familles :

1. Les pompes volumétriques
2. Les pompes roto-dynamiques

L'utilisation d'un type de pompes ou d'un autre dépend des conditions d'écoulement du fluide. De manière générale, les pompes volumétriques sont utilisées pour générer une pression importante, mais ici le débit sera limité, tandis que les pompes roto-dynamique sont utilisé pour véhiculer de grands débits en gardant une pression moins importante r elativement aux pompes centrifuge.

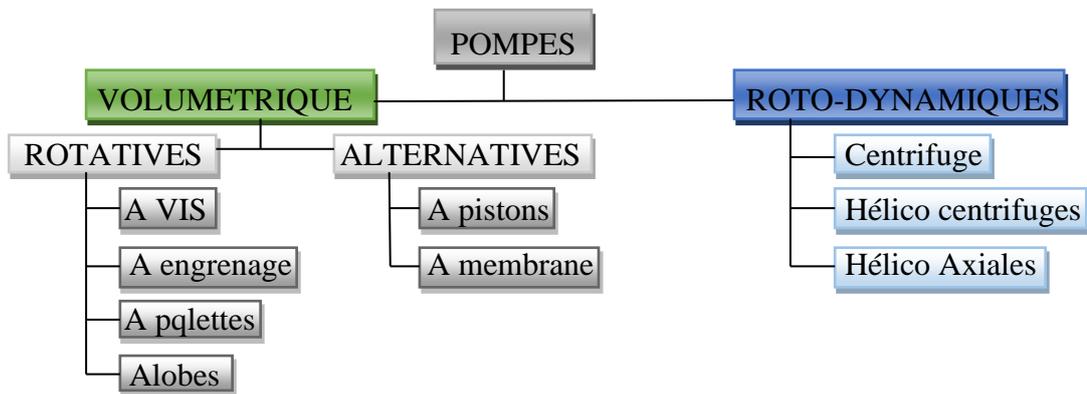


Figure I.1: Classification des pompes

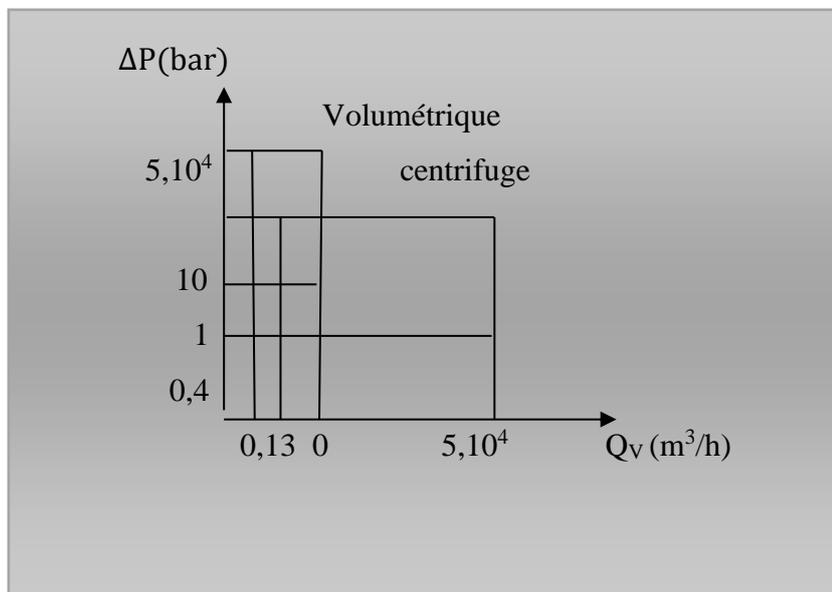


Figure I.2: Les intervalles d'utilisation des pompes

I.2.1. 1. Les pompes volumétriques

Les pompes volumétriques sont constituées d'un volume hermétiquement clos (corps de pompe) à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile engendrant soit une dépression à l'aspiration, soit l'impulsion nécessaire au refoulement afin de vaincre la contre-pression régnant à l'aval de la pompe, soit enfin l'une et l'autre de ces fonctions et permettant ainsi le transfert d'un volume de liquide, de viscosité plus ou moins importante, depuis l'aspiration vers le refoulement. Le fluide véhiculé étant incompressible, ces pompes sont toujours équipées d'un dispositif de sécurité d'excès de pression associé.

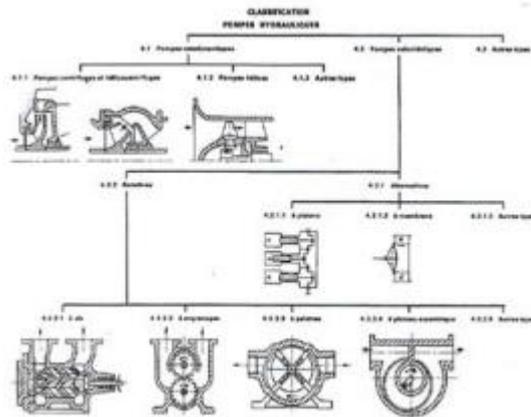


Figure I.3: Les pompes volumétriques

Les pompes volumétriques sont caractérisées par une grande diversité d'emploi et une grande variété de réalisations technologiques. On se limitera ici, à la présentation de quelques types de ces deux grandes familles de machines tournantes :

1. Les pompes volumétriques rotatives
2. Les pompes volumétriques alternatives

Les pompes volumétriques alternatives usuelles font appel à deux principes :

- ✓ Le déplacement d'un piston animé d'un mouvement alternatif :

Selon le cas, le piston peut être en contact avec le cylindre, ou ne pas être en contact avec les parois de la chambre qui contient le liquide.

- ✓ La déformation d'une membrane :

Le mouvement de la membrane est imposé, dans le cas général, par la pression obtenue sur la face arrière par une pompe à piston plongeur.

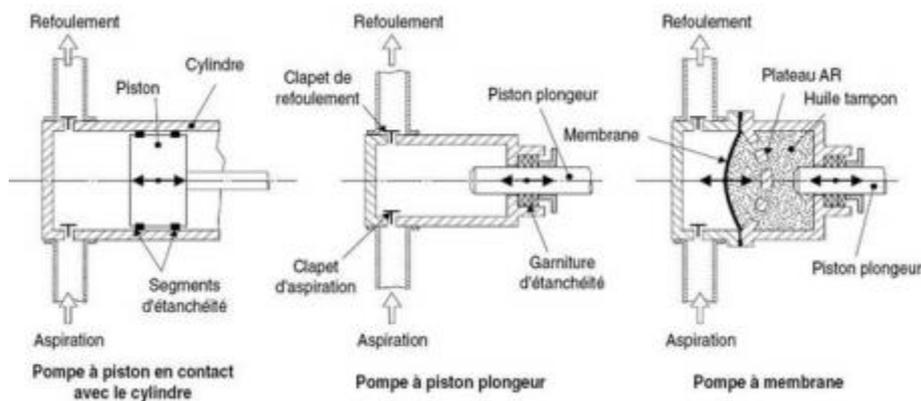


Figure I.4: les pompes volumétriques alternatives

1-Pompes rotatives

A- Pompes à vis

Elles sont constituées de deux ou trois vis s'engrenant entre elles. Le liquide remplit les cavités qui existent entre les vis et le corps. Pendant la rotation des vis, les cavités se déplacent transférant ainsi du liquide de la zone d'aspiration vers la zone de refoulement. Ce type de pompe volumétrique admet une vitesse de rotation élevée (3000 t/mn) ; elles sont silencieuses et permettent d'atteindre des pressions assez élevées (≈ 100 bar).

Elles ne véhiculent que des liquides à bon pouvoir de lubrification et ne contenant pas de particules abrasives.

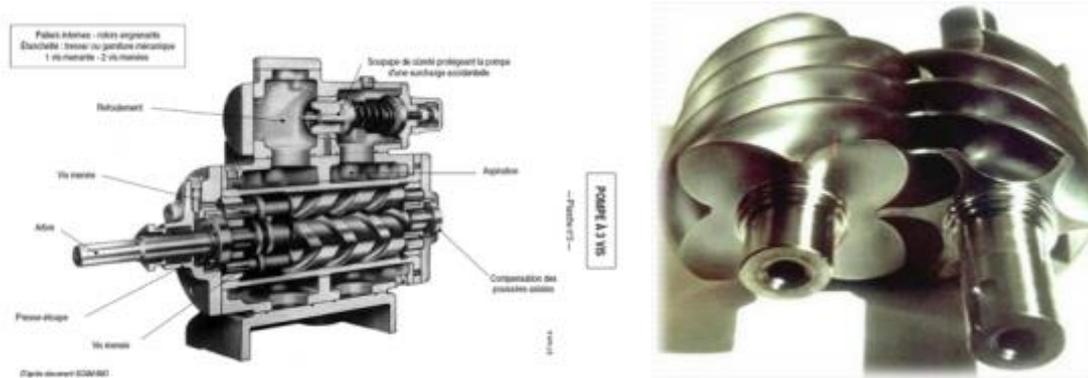


Figure I.5: pompe à vis

B-Pompes à engrenages

Il existe un grand nombre de variantes de ce type de pompes, elles diffèrent entre elles par la disposition et la forme des dentures. Le liquide à véhiculer est aspiré dans l'espace compris entre deux dents consécutives et le corps de la pompe. L'étanchéité entre l'aspiration et le refoulement est assurée par un contact entre les dents en prise. Les dentures peuvent être droites, hélicoïdales, ou encore à chevrons. Cette dernière possibilité présentant l'avantage de rendre le mouvement plus uniforme. Ce type de pompes admet une vitesse de rotation de 2000 à 3000 tr/min ; elles sont relativement silencieuses et permettent d'atteindre des pressions de l'ordre de 20 à 50 bar. Elles sont équipées de quatre paliers, et d'un à quatre boîtiers d'étanchéité. Elles ne tolèrent pas le passage de particules solides sans risque de destruction totale.

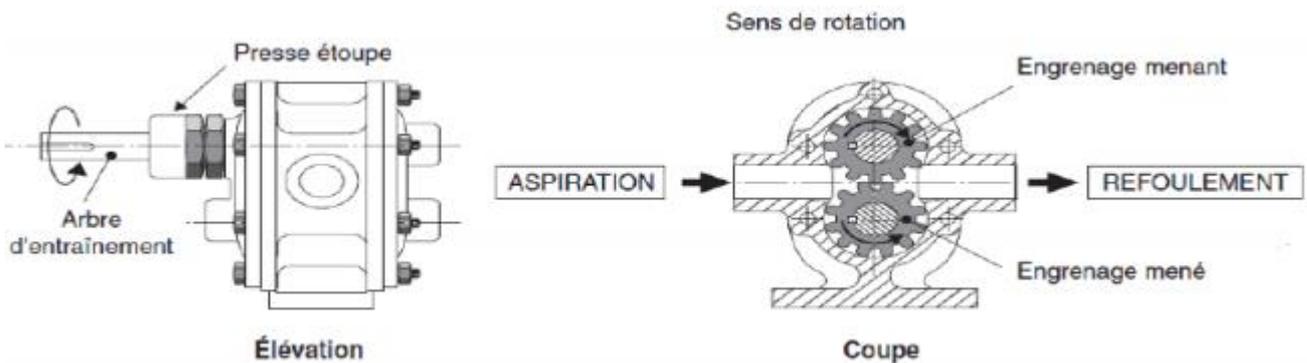


Figure I.6: Pompe à engrenages a denture droite

Pompes à rotor hélicoïdal excentré:

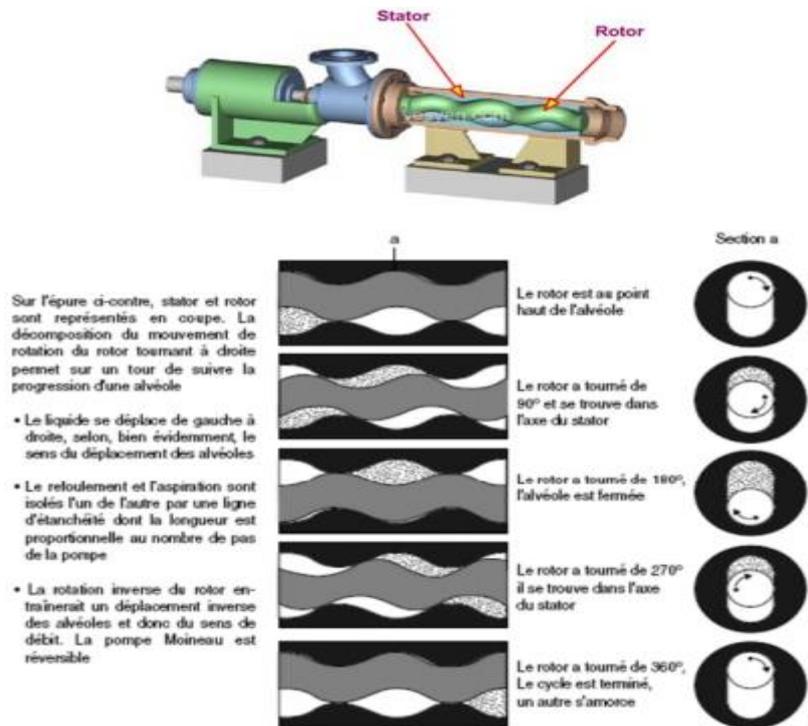


Figure I7 : Pompes à rotor hélicoïdal excentré

C-Pompes à palettes

a-Pompes à palettes libres

Une pompe à palettes est constituée par un rotor A, tournant à l'intérieur d'un corps cylindrique B. Le rotor est muni d'un certain nombre de rainures radiales dans lesquelles sont logées à frottement doux les palettes C. Le rotor est monté excentré par rapport au corps (excentrage fixe). Durant la rotation, en raison de la force centrifuge, et du frottement doux, les palettes sont maintenues en contact avec la surface intérieure du corps de la pompe.

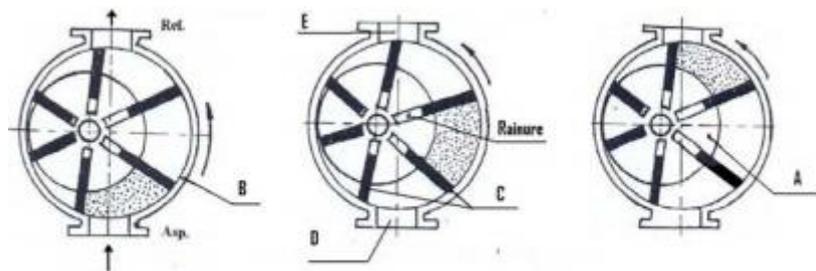


Figure I.8 : Pompe à palettes libres

b-Pompes à palettes flexibles

L'ensemble rotor - palettes est en élastomère. Il entraîne le liquide jusqu'au refoulement où les palettes sont fléchies par la plaque de compression et permettent l'expulsion du liquide. Comme toutes les pompes à palettes, ces pompes n'entraînent ni brassage, ni laminage, ni émulsion du produit. Elles peuvent également pomper des particules solides.



Figure I.9: Pompe à palettes flexibles

D-Pompes à Lobes

Le principe reste le même que celui d'une pompe à engrenages externes classique à ceci près que les dents ont une forme bien spécifique et qu'il n'y a que deux ou trois dents (lobes) par engrenage. Les rotors ne sont jamais en contact et, pour ce faire, sont entraînés par des engrenages externes. De ce fait, le pouvoir d'aspiration reste faible.

Ce type de pompe se nettoie facilement, c'est pourquoi il est très utilisé dans l'industrie alimentaire. Le débit peut atteindre 400 m³/h pour les plus gros modèles, la pression au refoulement est de l'ordre de quelques bars et la viscosité quelques dizaines de milliers de cSt.

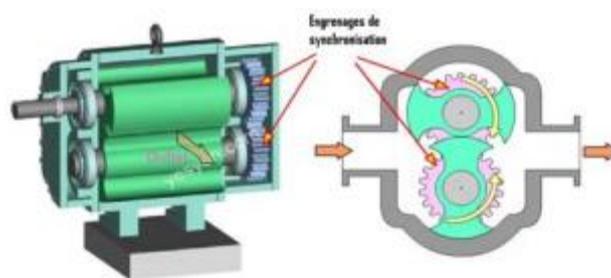
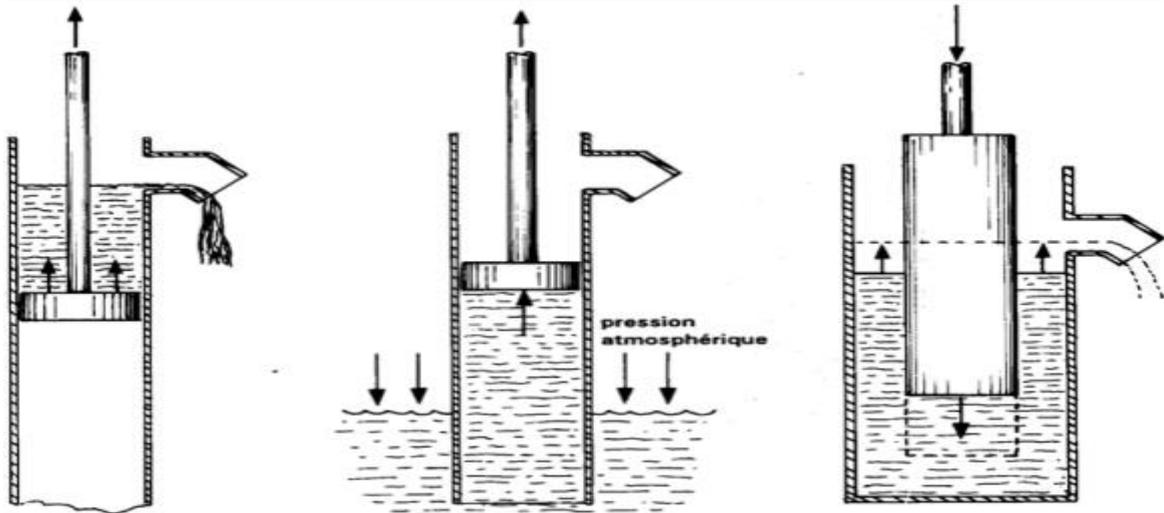


Figure I.10: Pompe à lobes

2- Pompes volumétriques alternatives (à pistons plongeurs, à membranes)

A-A pistons plongeurs

Les pompes à pistons sont disponibles en plusieurs versions selon le débit, les caractéristiques techniques et les accessoires. Elles servent à transporter les barbotines céramiques et les suspensions denses et abrasives. Elles sont particulièrement indiquées pour l'alimentation des atomiseurs et des filtres presses, Ce type de pompe fait appel aux deux principes de base (a) et (b) de la figure . Pendant la course ascendante, l'eau est aspirée dans le cylindre ou corps la pompe lors de l'ouverture du clapet de retenue, le clapet du piston est maintenu fermé par le poids de l'eau qui se trouve au-dessus (principe b de la figure). En même temps, l'eau au-dessus du piston est foulée vers la sortie de la pompe (principe a de la figure). Lors de la course descendante, le clapet de retenue est maintenu fermé à la fois sous son propre poids et du fait de la pression de l'eau, tandis que le clapet du piston est ouvert sous la pression de l'eau emprisonnée dans le cylindre qui passe à travers le piston, jusqu'au bout de la course descendante pour reprendre le cycle de nouveau.



Elévation directe

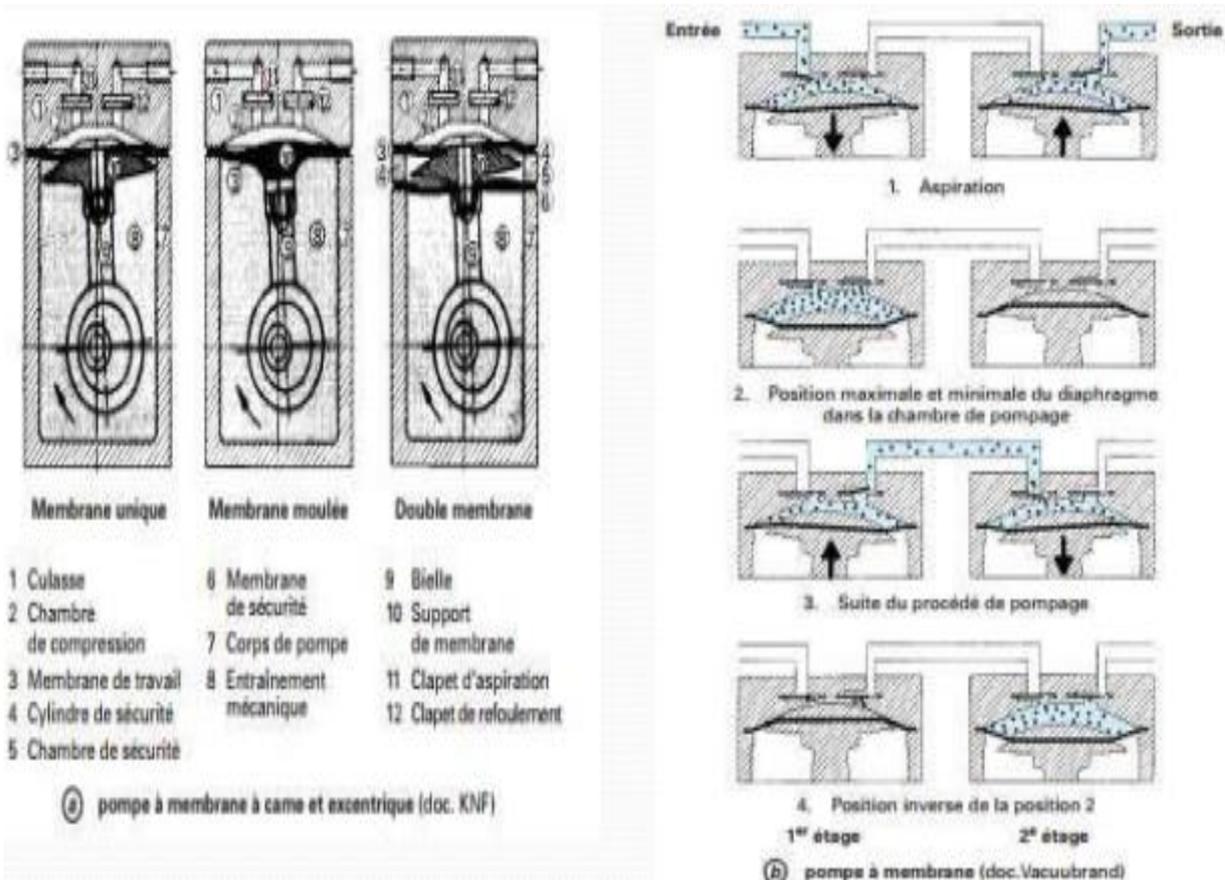
Aspiration

Foulage

Figure I.11: Pompe à pistons plongeurs

B-Pompe à membranes

- Le déplacement du piston est remplacé par les déformations alternatives d'une membrane en matériau élastique (caoutchouc, élastomère,etc.).
- Ces déformations produisent les phases d'aspiration et de refoulement que l'on retrouve dans toute pompe alternative (Figure ci-dessous).
- Ces pompes sont utilisées pour des débits moyens de l'ordre de 80 m³/h, pour des températures inférieures à 150 °C et des viscosités faibles .



Pompe a membrane a came et excentrique (doc.KNF)

Pompe a membrane (doc. vacuubrandi)

Figure I.12: Pompe à pompe membranes

I.2.1. 2. Les pompes roto-dynamiques

-Les pompes centrifuges

Il est bien établi que pour faire circuler ou relever un fluide à une hauteur bien déterminée, on ait généralement appel à une pompe entraînée par un moteur . La plupart des circuits en charge comportent en effet un dispositif de pompage en amont.

Les pompes centrifuges sont composées d'une roue à aubes qui tourne autour de son axe, d'un statr constitué au centre d'un distributeur qui dirige le fluide de manière adéquate à l'entrée de la roue, et d'un collecteur en forme de spirale disposé en sortie de la roue appelé volute.

Le liquide arrivant par l'ouïe est dirigé vers la roue en rotation qui sous l'effet de la force centrifuge lui communique de l'énergie cinétique. Cette énergie cinétique est transformée en énergie de pression dans la volute.

Un diffuseur à la périphérie de la roue permet d'optimiser le flux sortant est ainsi de limiter les pertes d'énergie.

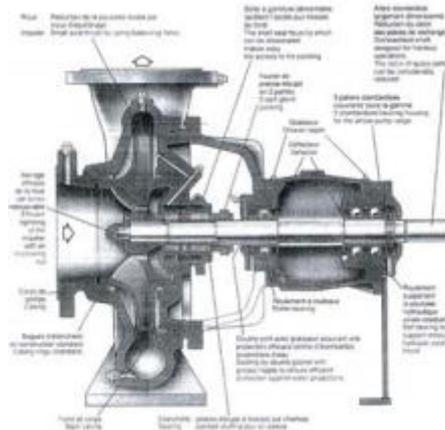


Figure I13 : Pompe centrifuge

Les roues des pompes centrifuges sont très souvent fermées. Elles sont constituées de deux flasques entretourées par les aubes. Elles peuvent être :

- ✓ Semi-ouvertes avec un seul flasque arrière.
- ✓ Ouvertes sans flasque ; les aubes sont reliées seulement au moyeu.

Toutes ces roues centrifuges sont alimentées axialement par le liquide qui, après circulation dans les canaux, sort radialement par rapport à l'axe de rotation.

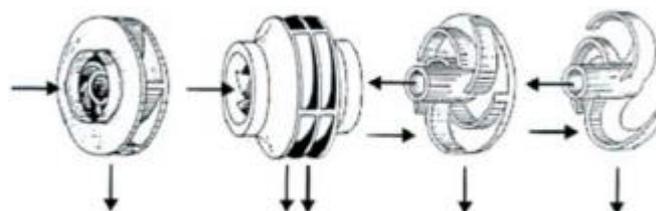


Figure I.14: Types d'un plusieurs des pompes centrifuges

A l'intérieur d'une turbomachine l'écoulement est instationnaire et tridimensionnel. Il dépend du temps et de l'espace ; (t, x, y, z) . On est donc amené à représenter l'écoulement par des grandeurs fictives. En un p

oint donné, la pression et les trois composantes de la vitesse, sont des valeurs moyennées dans le temps. Sur une surface donnée les pressions et les vitesses que l'on considère sont des valeurs moyennées sur l'ensemble de la surface. On raisonne comme si l'écoulement est uniflore et ne dépend que d'une seule variable d'espace ; le rayon. On suppose aussi que les surfaces d'écoulement sont axisymétriques. Ces simplifications sont à la fois nécessaires et justifiées par l'expérience.

I.3. Les Turbines

Une turbine est un dispositif rotatif à combustion externe. Permet de transformer l'énergie d'un fluide vers une énergie mécanique à partir d'un arbre qui peut être utilisé au plusieurs domaines (production de l'électricité, alimenter une pompe...etc).

Les centrales électriques utilisent, principalement, deux types de turbines couplées à un alternateur: les turbines à gaz et les turbines à vapeur

I.3. 1-La turbine à gaz:

La turbine à gaz est une machine thermique qui appartient à la famille des moteurs à combustion interne. Elle permet de transférer l'énergie thermique en énergie mécanique par l'entraînement en rotation d'un arbre lui-même couplé à une machine industrielle ou à une hélice, ou bien de l'énergie cinétique par détente des gaz en sortie de la turbine dans une tuyère (Turbo réacteur).

Généralement, les turbines à gaz se répartissent en deux classes:

- les turbomoteurs fournissant de l'énergie mécanique disponible sur un arbre.
- les turboréacteurs fournissant de l'énergie cinétique utilisable pour la propulsion.

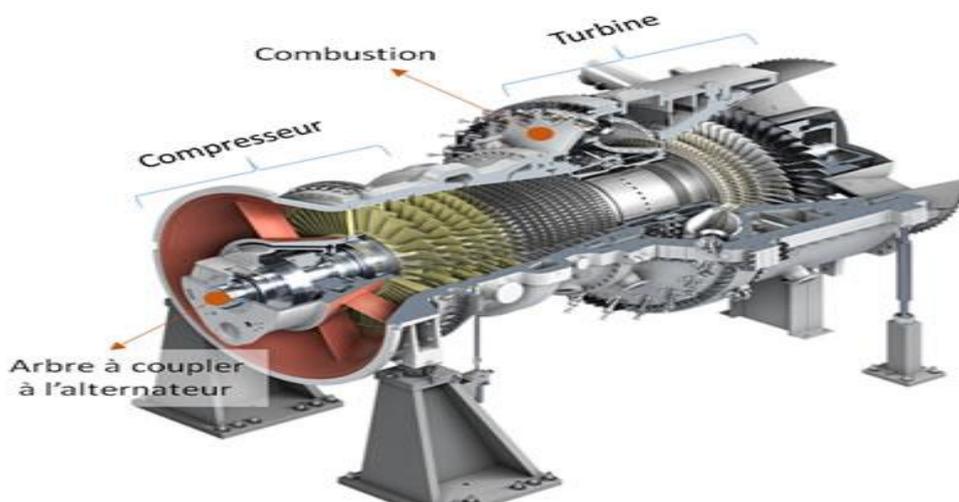


Figure I.15: La turbine à gaz

La turbine à gaz peut être considérée comme un système autosuffisant. Le compresseur aspire et comprime l'air. L'air comprimé entre à la chambre de combustion pour augmenter sa puissance énergétique, pour convertir, en suite, cette puissance en énergie mécanique utile pendant les processus de détente qui a lieu dans la section turbine. L'énergie mécanique qui en résulte est transmise par l'intermédiaire d'un accouplement à une machine réceptrice, qui produit la puissance utile pour le processus industriel.

I.3. 2-La turbine à vapeur

Une turbine à vapeur est constituée d'un grand nombre de roues (une centaine pour un modèle de puissance) portant des ailettes. La vapeur sous pression traverse d'abord les roues de petit diamètre avant d'atteindre les roues de plus grand diamètre. La turbine tourne alors en entraînant l'alternateur qui lui est accouplé.

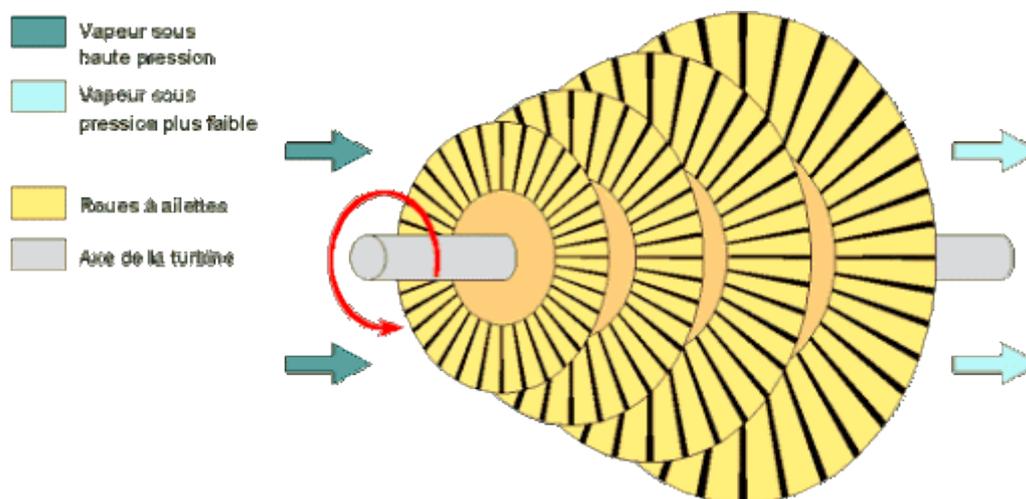


Figure I.16: la turbine à vapeur

I.4. Compresseur

Un compresseur est une machine qui a pour fonction d'élever la pression du fluide compressible qui le traverse. Son nom traduit le fait que le fluide se comprime (son volume diminue) au fur et à mesure de l'augmentation de pression. L'élévation de pression d'un gaz pour un compresseur est utilisée pour atteindre un niveau de pression déterminé par des processus tels que :

- Les réactions chimiques (pression convenable le catalyseur).
- Le stockage dans les cavités.
- La liquéfaction ou la séparation.
- les cycles de réfrigération.
- L'alimentation des réseaux d'air comprimé.

I.4.1- Définition des compresseurs

Un compresseur est un organe mécanique destiné à augmenter par un procédé uniquement mécanique la pression d'un gaz. Pour exercer la même fonction sur un liquide, quasi incompressible, on utilise une pompe .

Les fluides traversant les compresseurs peuvent être de nature diverse :

- Gaz pur.
- Mélange gazeux
- Vapeur surchauffée ou saturée.

Les compresseur à compression axial, compriment l'air en la déplaçant par les ailettes en rotation et augmentant la pression dans les parties fixes adaptées. Les deux principaux éléments du compresseur à débit axiale sont le rotor et le stator, une rangée d'aubes du rotor alterne avec une rangée d'aubes du stator. La plupart des compresseurs à débit axial sont conçu pour délivrer de l'air à des pressions 10 à 15 fois la pression d'entrée, le taux de compression de la 9FA est de 15:1.

A pleine charge, le compresseur utilise à peu près les deux tiers de l'énergie produite par les étages de la turbine, le tiers restant est utilisé pour faire fonctionner l'alternateur et produire de l'électricité. Il est extrêmement important que les aubages du compresseur demeurent propres afin de garantir l'efficacité et les performances maximales du compresseur. Un système de nettoyage, en marche et hors marche, avec savon, est prévu pour maintenir le compresseur propre et efficace.

Aubes directrices (IGV): Dirige l'air venant de l'admission vers le compresseur, régler à différents degrés selon, le démarrage, les différentes charges ou encore l'arrêt de la machine.

28.5° correspond à la fermeture complète, 44.9° en montée et mode pré-mélangé ainsi qu'à basse charge et jusqu'à 88° en pleine charge.

Il y deux sous tirage au compresseur, au 9e et au 13e étages de compression. Le sous tirage du 9e entre en jeux lors des démarrages et des arrêts, il intervient pour la protection contre les vibrations, le sous tirage du 13e lui sert au refroidissement du 1er et du 2e étage des aubes de la turbine ainsi que l'injecteur du 1er étage et l'anneau de renforcement. La TG n'utilise que 25% de l'air comprimé produite pour la combustion.

Les compresseurs peuvent être classés selon caractéristiques suivants :

- le principe de fonctionnement (volumétrique, dynamique).
- mouvement des pièces mobiles (mouvement linéaire, rotatif).
- les compresseurs d'air.
- les compresseurs des gaz.

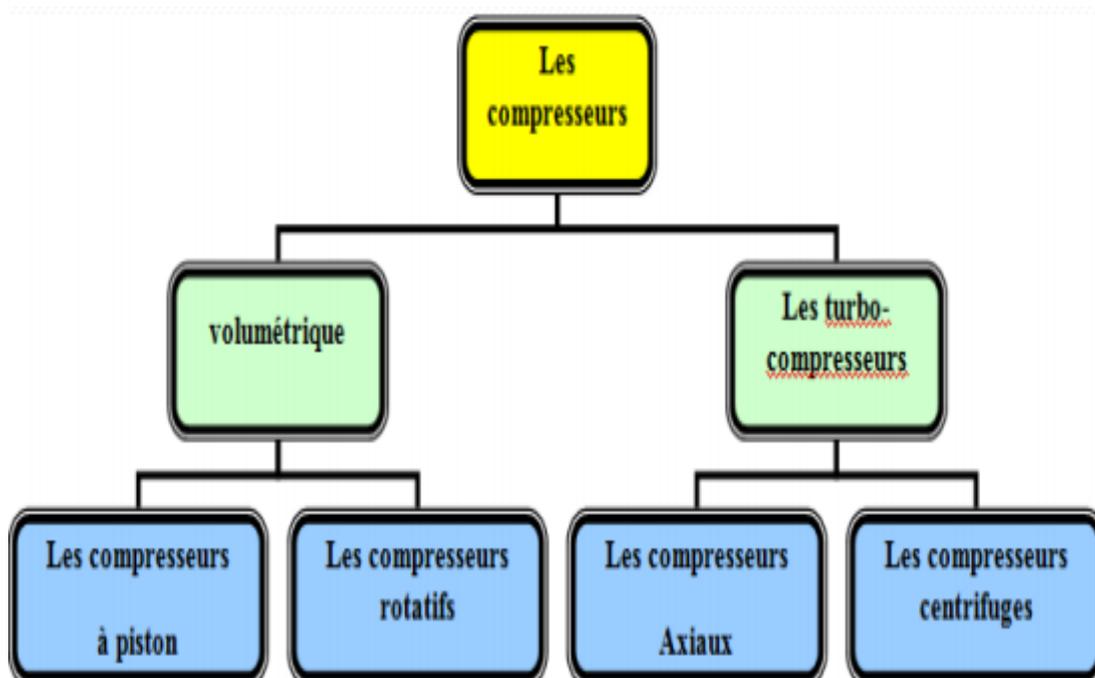


Figure I.17: Classification des compresseurs

I.4.2-Choisir un compresseur performant

Le choix optimal de la technologie de compresseur doit prendre en compte les besoins spécifiques du procès. Ce choix est important car il affecte directement l'efficacité énergétique du système, en jouant à la fois sur les performances du compresseur lui-même, mais aussi sur les autres éléments du réseau d'air .

Les spécifications de choix doivent reprendre les éléments suivants

- Les informations sur le site et son passé.
- Les besoins (pression, débit) moyens, maximum (les pics) mais aussi minimum.
- La plage de température ambiante sur le site de fonctionnement, ainsi que les niveaux de pression attendus.
- Les températures maximum attendues des fluides de refroidissement (air ou eau) sur le site.
- L'altitude du site au dessus de la mer.
- Les stratégies de régulation du compresseur en fonction du besoin.
- La pression minimale requise au point d'utilisation.
- La qualité du gaz requise au point d'utilisation.
- Le niveau de bruit maximum.
- Le nombre d'heures d'utilisation par an.

I.4.3-Les compresseurs alternatifs à pistons

- Les gros compresseurs à piston peuvent être les compresseurs les plus efficaces énergétiquement. La consommation spécifique des machines lubrifiées varie de 100 à 142 Wh/Nm³, celle des machines exemptes d'huile de 112 à 153 Wh/Nm³ (cf. tableau des caractéristiques des compresseurs).

- Le rendement énergétique décroît rapidement lorsque que la maintenance n'est pas régulièrement assurée.

- Les machines refroidies par eau sont plus efficaces énergétiquement que celles refroidies par air, à charge nominale mais également à charge partielle.

- Il permet d'atteindre des pressions élevées (supérieures à 14 bars).

I.5- La Machine Tournante Ou La Conversion Electromagnétique

1 -Principes

•Un convertisseur électromécanique ou "machine tournante" assure une transformation réciproque d'énergie électrique en travail mécanique de translation et, le plus souvent, de rotation.

• C'est deux formes d'énergie n'étant pas stockables, la conversion se réalise donc en passant par une forme d'énergie stockable: électrostatique ou, plus couramment et plus efficacement, électromagnétique.

• La conversion d'énergie électrique-mécanique (moteurs) et la conversion d'énergie mécanique-électrique (générateurs) sont réalisables dans les mêmes structures de machine tant sur le plan physique que technologique.

- La structure de ces machines est toujours constitué d'un circuit magnétique, lieu de stockage et de conversion d'énergie qui se produit en deux temps (électrique magnétique mécanique) et d'une ou plusieurs bobines excitant le circuit magnétique.
- Le circuit magnétique comprend toujours deux composantes ferromagnétiques, une fixe (stator) et une mobile (rotor), ainsi qu'un entrefer où les parties ferromagnétiques canalisent le flux magnétique.
- L'entrefer est le principal lieu de stockage et donc de conversion de l'énergie magnétique. Il est aussi nécessaire pour que le rotor puisse être mécaniquement indépendant du stator et tourner librement autour de son axe.
- L'entrefer peut être de largeur constante (entrefer lisse) ou non constante.
- Le circuit magnétique est constitué de tôles magnétiquement douces (sièges des pertes ferromagnétiques) ou d'aimants permanents. Le plus souvent, il est feuilleté afin de limiter l'extension de spires de courants de Foucault et les pertes qui en résultent.
- Les tôles sont excités par des bobinages fortement inductifs, recevant l'énergie électrique et qui sont aussi le siège de pertes joule.
- Le circuit électrique est donc essentiellement caractérisé par ses résistances électriques et ses inductances propres et mutuelles.
- Du point de vue mécanique, la position du rotor ne dépend que d'un paramètre de position linéaire ou angulaire. Les autres mouvements (vibrations) sont généralement négligés mais ils existent et doivent au moins contrôlés sinon combattus.
- L'axe du convertisseur fournit une puissance utile mécanique. Il est aussi le siège de pertes mécaniques (frottements). L'ensemble des pertes joue un facteur dans le rendement énergétique de la conversion.

2 -Conversion d'Energie

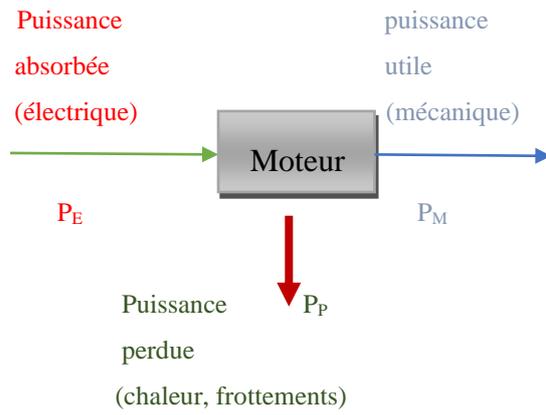
- Comme nous l'avons déjà fait remarqué, la machine tournante une conversion d'une forme d'énergie en une autre forme d'énergie et vice versa. Dans notre cas il s'agit de transformation entre les énergies électrique et mécanique.
- De ce fait, deux régimes de fonctionnement peuvent alors exister:

Le fonctionnement moteur.

Le fonctionnement génératrice.

-Fonctionnement Moteur

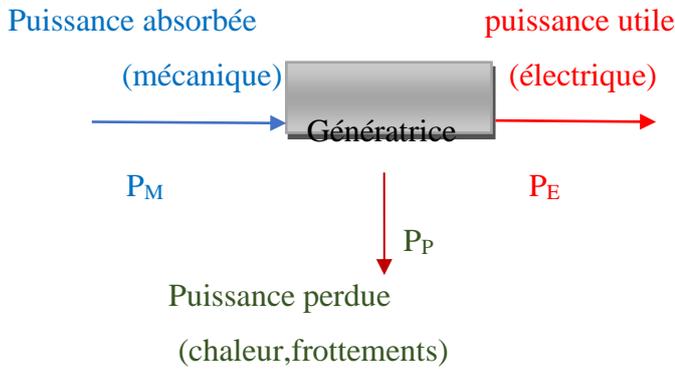
- L'énergie électrique est transformée en énergie mécanique.
- On rappelle qu'en régime continu, l'énergie W est égale à la puissance P multipliée par le temps t ($W = P.t$) avec $1kW.h = 1kW.1h$ ou $1Joule = 1W.1s$



- On peut en définir le rendement comme: $n = \frac{P_M}{P_E} = \frac{P_M}{P_M + P_P}$

4-Fonctionnement Génératrice:

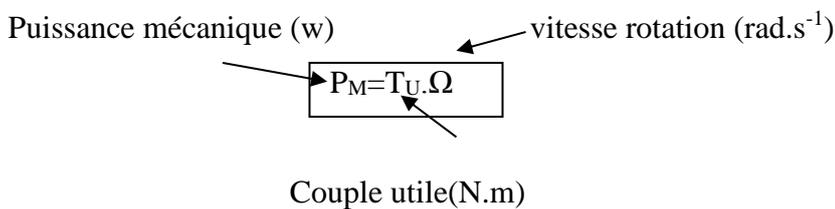
- L'énergie mécanique est transformée en énergie électrique .



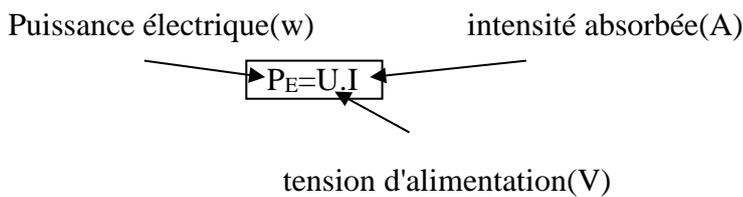
- On peut en définir le rendement comme: $n = \frac{P_E}{P_M} = \frac{P_E}{P_E + P_P}$

5-Expressions des Puissances:

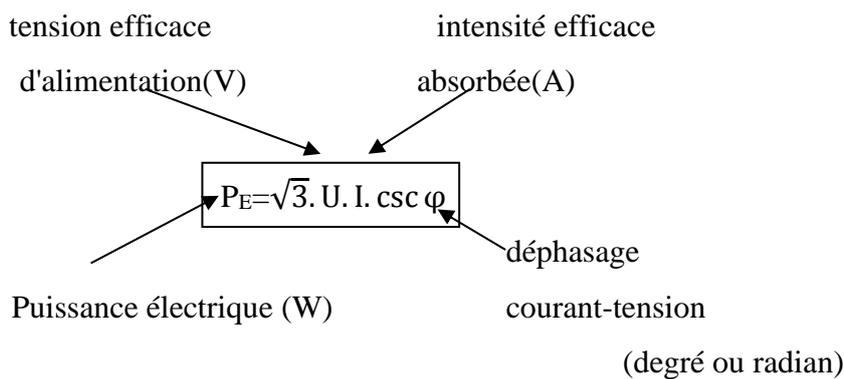
- Puissance mécanique:



- Puissance mécanique: en régime continu:



- Puissance électrique en régime alternatif sinusoïdal:



6-Conversion

- Les machines électriques tournantes sont réversibles, la même machine peut fonctionner en moteur ou en génératrice (exemples ci-dessous avec trois familles de moteurs).

- Le moteur à courant continu:

Une action mécanique sur le rotor produit une tension continue au stator, c'est la génératrice à courant continu (dynamo).

- Le moteur à courant alternatif:

- Le moteur synchrone utilisé en génératrice va produire une tension de fréquence directement proportionnelle à la vitesse de rotation c'est la génératrice synchrone (alternateurs des centrales électriques).

- Le moteur asynchrone utilisé en génératrice va produire une tension de fréquence légèrement inférieure au cas de la synchrone c'est la génératrice asynchrone (centrales éoliennes).

- Le moteur pas à pas:

- Une action mécanique sur un moteur pas à pas va produire une tension alternative à chaque enroulement du stator. Le moteur pas à pas est lui aussi réversible mais n'est, en principe, pas utilisé en génératrice.

7-Constitution/Fonctionnement

- Le Stator:

- Dans le cas d'un moteur, le stator est alimenté en électricité et produit un champ magnétique inducteur.

- Dans le cas d'une génératrice, le stator produit une tension induite par le champ magnétique variable produit par le rotor en rotation.

- Le Rotor:

- Le rotor est la partie tournante de la machine, les courants rotoriques produisent un champ magnétique (champ induit) qui réagit mécaniquement avec le champ inducteur (stator) et produit un couple de rotation.

- Remarque importante:

- Le couple mécanique est maximum lorsque le champ inducteur

$\mathbf{B}_{\text{stator}}$ est perpendiculaire au champ induit $\mathbf{B}_{\text{rotor}}$

CHAPITRE II

LES TURBINES

II.1.Les Turbines

Une **turbine** est un dispositif rotatif convertissant partiellement l'énergie interne d'un fluide, liquide (comme l'eau) ou gazeux (vapeur, air, gaz de combustion), en énergie mécanique au moyen d'aubes disposées sur un arbre tournant à grande vitesse.

L'énergie entrante du fluide est caractérisée notamment par sa vitesse, sa pression, son enthalpie. L'énergie mécanique sortante de la turbine entraîne un autre mécanisme rotatif comme un alternateur, un compresseur, une pompe ou tout autre récepteur (exemple un générateur). L'ensemble est alors respectivement appelé turbo-alternateur, turbocompresseur, turbopompe, etc.

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

Ce cycle comprend au moins les étapes suivantes :

- L'eau est mise en pression par une pompe pour être envoyée vers la chaudière ;
- L'eau est chauffée, vaporisée et surchauffée ;

Dès que cette vapeur doit être utilisée elle effectue les étapes suivantes :

- La vapeur se détend en fournissant de l'énergie cinétique que la turbine convertit en énergie mécanique ;
- La vapeur détendue se condense au contact d'une source froide sous vide partiel^[réf. nécessaire].

Le fluide utilisé est donc le même que celui de la machine à vapeur à pistons, mais la turbine en constitue une évolution exploitant les principaux avantages des turbomachines à savoir :

- Puissance massique et puissance volumique élevées ;
- Rendement amélioré par la multiplication des étages de détente.

La turbine à vapeur est l'aboutissement d'un type de machines thermiques introduit par les machines à vapeur à piston. Les contraintes inhérentes à leur conception restreignent généralement leur usage à l'industrie. Dans ce cas on obtient de l'électricité bon marché car l'énergie thermique n'est pas « gaspillée » dans un condenseur. On appelle ces turbines, « turbines à contrepression ». On rencontre cette utilisation, en particulier, dans les sucreries, entre autres, de cannes à sucre, où le combustible est gratuit et surabondant : c'est la bagasse, la canne à sucre écrasée dont on a extrait le sucre.

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

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

- La détente de la vapeur qui correspond à la conversion de l'énergie potentielle de pression en énergie cinétique,

- La conversion de l'énergie cinétique en couple de rotation de la machine par le biais des aubages mobiles.

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

1. Les turbines à action dans lesquelles la détente se fait uniquement dans les aubages fixes. Elles sont bien adaptées aux étages à forte pression et se prêtent mieux à la régulation de débit. Leur construction est plus coûteuse et réserve leur emploi aux premiers étages de la turbine.
2. Les turbines à réaction dans lesquelles la détente est répartie entre les aubages fixes et mobiles. Le degré de réaction est défini par la répartition de la détente entre les aubages. Elles se prêtent mieux aux étages à basse pression et leur coût est plus faible. Lorsque le degré de réaction d'un étage est de 50 %, la forme des aubages fixes et mobiles est la même ce qui diminue le nombre de moules nécessaires à la fabrication. Par contre pour réaliser la même détente, la turbine à réaction demandera plus d'étages, ce qui augmente la longueur de la ligne d'arbre.

La réalisation des turbines nécessite le recours à des aciers fortement alliés (Cr-Ni-V) pour résister aux contraintes thermiques, mécaniques (force centrifuge) et chimique (corrosion par la vapeur), voir l'utilisation de superalliage à base Ni. Les deux premières contraintes limitent le diamètre et donc le débit admissible aux derniers étages. Ainsi des aubes de plus d'un mètre de longueur posent déjà de sérieux problèmes de réalisation. De plus, l'hétérogénéité radiale des vitesses impose une incidence variable de l'aube qui présente alors une forme gauche dont l'usinage est complexe et dont les contraintes mécaniques limitent la bonne tenue.

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

De ce fait, les turbines de forte puissance comprennent généralement sur un même axe (disposition tandem compound) :

- Une turbine haute pression,
- Plusieurs (2 ou 3) turbines basse pression avec soutirages.

Il est ainsi possible d'atteindre des puissances de plus de 1 000 MW avec un rendement de cycle dépassant légèrement 40 %.

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

Mais il existe également de nombreuses petites turbines équipant les turbocompresseurs des véhicules. Les plus petites turbines étant certainement les Turbines dentaires.

Le principal avantage des turbines à vapeur est d'être un [moteur à combustion externe](#). De ce fait, tous les [combustibles](#) (gaz, fioul, charbon, déchets, chaleur résiduelle) et notamment les moins chers peuvent être

utilisés pour l'alimenter en vapeur. Le chauffage peut même se faire par [énergie solaire](#). Le rendement peut atteindre des valeurs assez élevées d'où des frais de fonctionnement réduits.

Par contre, le coût et la complexité des installations les réservent le plus souvent à des installations de puissance élevée pour bénéficier d'économies d'échelle. Hormis des cas particuliers, les [moteurs](#) et [turbines à gaz](#) sont mieux adaptés en dessous d'environ 10 MW.

Le refroidissement du condenseur nécessite de plus un important débit d'eau ou des [aéroréfrigérants](#) encombrants ce qui limite d'emblée leur domaine d'emploi aux installations fixes ou navales.

Dans les pays nordiques, mais aussi dans certaines grandes agglomérations françaises (Paris, Lyon, Nantes...), on utilise régulièrement la chaleur résiduelle pour réaliser un réseau de chauffage (voir [Cogénération](#)). Les conduits acheminement de l'eau chauffée de 80 à 90 °C dans les communes en proximité de centrale et les particuliers ou les entreprises peuvent se connecter à ce réseau pour chauffer les bâtiments.

Le rendement croît avec la [pression](#) de la vapeur et avec la [température](#) de [surchauffe](#). Cependant, l'augmentation de ces caractéristiques est limitée par la teneur en liquide de la vapeur en fin de détente. En effet, la courbe de détente peut atteindre la courbe de saturation avec formation de gouttelettes qui nuisent à l'efficacité des derniers étages de détente mais aussi à sa tenue mécanique. La teneur en eau liquide du mélange doit être limitée à 15 ou 30 % [\[réf. nécessaire\]](#). In fine, c'est la pression dans le [condenseur](#) qui fixe, de ce fait, les pressions et températures limites, admissibles.

Comme n'importe quel autre cycle thermodynamique, le [Cycle de Rankine](#) mis en œuvre par les turbines à vapeur est inférieur au [cycle de Carnot](#), et des améliorations ont donc été imaginées pour tendre vers celui-ci. Ainsi, le réchauffage de l'eau, entre le condenseur et la chaudière, par de la vapeur soutirée à différents étages de la turbine, permet de faire tendre la phase de chauffage [isobare](#) vers une transformation équivalente sur le plan [thermodynamique](#) à une [isotherme](#). L'efficacité du dispositif mais également son coût croissent avec le nombre d'étages de soutirage et d'échangeurs associés ; de ce fait, le nombre d'étages dépasse rarement sept unités. Le gain de rendement est de l'ordre de 5 % [\[réf. nécessaire\]](#). Ce dispositif impose de plus l'installation d'un réchauffeur d'air sur la chaudière.

D'autre part, afin de permettre d'augmenter la pression et la température malgré le problème de l'humidité en fin de détente, il est possible de renvoyer la vapeur détendue jusqu'à la [pression de vapeur saturante](#) vers la chaudière pour procéder à une resurchauffe dans un [échangeur de chaleur](#) supplémentaire. Ces étapes peuvent être multipliées pour faire tendre la phase de surchauffe vers une isotherme et donc de s'approcher d'un cycle de Carnot. Dans la pratique, les installations comprennent généralement une seule resurchauffe. Le gain de rendement peut atteindre 5 %.

Le cycle comprend fondamentalement deux changements d'état ([évaporation](#) et [condensation](#)). Le [diagramme de phases](#) de l'eau permet d'envisager un cycle à un seul changement d'état par l'utilisation d'une chaudière supercritique. En effet, au-delà du [point critique](#) (environ 220 bars et 350 °C) ne se produit plus de changement d'état et les phases liquides et gazeuses ne peuvent plus être distinguées. Les cycles supercritiques nécessitent généralement une double resurchauffe pour limiter l'humidité en fin de cycle. Le

gain de rendement est encore de 2 à 3 % et se justifie plus facilement avec le renchérissement des [combustibles](#)

II.1.1. Les turbines à gaz

II.1.1.1. Généralités sur les turbines à gaz

La turbine à gaz est un moteur à combustion interne de tous les points de vue. Elle peut être considérée comme un système autosuffisant. En effet, elle prend et comprime l'air atmosphérique dans son propre compresseur, augmente la puissance énergétique de l'air dans sa chambre de combustion et convertit cette puissance en énergie mécanique utile pendant les processus de détente qui a lieu dans la section turbine. L'énergie mécanique qui en résulte est transmise par l'intermédiaire d'un accouplement à une machine réceptrice, qui produit la puissance utile pour le processus industriel. Sous sa forme la plus simple, une turbine à gaz comprend un compresseur axial qui aspire l'air à la pression atmosphérique; une chambre de combustion, où l'air comprimé est réchauffé à pression constante par la combustion d'une certaine quantité de combustible (gaz naturel, gasoil ou kérosène) et enfin une turbine de détente des gaz jusqu'à la pression atmosphérique.

II.1.1.2. Classification des turbines à gaz

1. Par le mode de construction

L'objectif pour lequel, on utilise la turbine à gaz définit le type qu'on doit choisir. Dans l'industrie, on trouve les turbines à un seul arbre, dites aussi mono-arbre. Elles sont généralement utilisées dans le cas où on cherche un fonctionnement avec une charge constante (pour entraîner les générateurs d'électricité). Un deuxième type, englobe les turbines à deux arbres bi-arbres; elles ont l'avantage d'entraîner des appareils à charges variables (pompes, compresseur,...). Elles se composent de deux parties, la première assure l'autonomie de la turbine, la deuxième est liée à la charge. Un troisième type peut être aussi cité, ce sont les turbines dites dérivées de l'aéronautique; Elles ont une conception spéciale suivant le domaine dans lequel elles sont utilisées. Dans ce troisième type, la partie qui assure l'autonomie de la turbine existe toujours, et l'énergie encore emmagasinée dans les gaz d'échappement est utilisée pour créer la poussée, en transformant cette énergie (thermique et de pression) en une énergie cinétique de jet dans une tuyère

2. Par le mode de travail

On distingue deux types de turbine:

❖ Turbine à action

Où l'énergie thermique est transformée complètement en énergie cinétique dans la directrice.

L'évolution des gaz dans la roue se fait sans variation de pression statique $P_1 > P_2 = P_3$.

❖ Turbine à réaction

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

$P1 > P2 > P3$. Le taux de réaction ϵ caractérisera le % d'énergie thermique totale.

3. Par le mode de fonctionnement thermodynamique:

Il existe deux cycles thermodynamiques:

- ❖ **Turbine à gaz à cycle fermé** : dans laquelle le même fluide est repris après chaque cycle

- ❖ **Turbine à gaz à cycle ouvert** : c'est une turbine dont l'aspiration et l'échappement s'effectuent directement dans l'atmosphère. Ce type de turbine qui est le plus répandu se divise en deux classes:
 - ❖ **Turbine à cycle simple** : c'est une turbine utilisant un seul fluide pour la production d'énergie mécanique, après la détente les gaz possédant encore un potentiel énergétique sont perdus dans l'atmosphère à travers l'échappement.
 - ❖ **Turbine à cycle régénéré** : c'est une turbine dont le cycle thermodynamique fait intervenir plusieurs fluides moteurs dans le but d'augmenter le rendement de l'installation.

De nos jours la turbine à gaz connaît une large utilisation et dans différents domaines et en particulier dans le domaine des hydrocarbures à cause de leur grande gamme de puissance et leurs propres avantages.

II.1.1.3. Principales applications :

Chaque cas d'application d'une turbine à gaz comprend un nombre important de paramètres de définitions spécifiques : type de combustible, durée de fonctionnement par an, températures extérieures extrêmes, montage, nuisances, etc. Il en résulte qu'une installation de turbine à gaz doit être personnalisée afin de répondre aux conditions d'exploitation envisagées.

Étudions tout d'abord les utilisations principales avant de passer en revue, au paragraphe suivant, les critères servant de base de réflexion pour choisir le dimensionnement d'une installation.

1. Utilisation des turbines à gaz pour la propulsion

L'utilisation de la turbine à gaz dans l'aviation (avions, hélicoptères) est bien connue. Dans le domaine des transports civils et militaires, les turbines à gaz sont également utilisées pour la propulsion, car elles permettent d'obtenir de grandes puissances avec des poids et dimensions faibles par rapport à ceux des moteurs diesels.

2. Production combinée chaleur-force

Ce type d'application permet d'économiser les dépenses d'énergies. Le couple de force peut servir à l'entraînement d'une machine réceptrice et la chaleur peut servir pour le chauffage, séchage, production de vapeur pour un procès industriel. Le principe de cette application peut être, encore poussé plus loin pour obtenir des installations industrielles dites à énergie totale où la turbine à gaz peut fournir simultanément trois formes d'énergie : électrique (alternateur), pneumatique (par prélèvement d'air sur le compresseur), calorifique (récupérateur de chaleur des gaz d'échappement). Le rendement de telles installations est ainsi fortement revalorisé et peut atteindre 50 à 60%.

3. Production d'électricité

Cette application est extrêmement courante : l'arbre de la turbine entraîne un réducteur dont l'arbre à petite vitesse entraîne un alternateur. Le système mécanique est simple et peut être comparé à un groupe turboalternateur à vapeur. Produire uniquement de l'électricité avec une turbine à gaz n'est intéressant que pour des conditions d'exploitation imposant ce système.

Dans tous les types d'applications étudiés, il est tout à fait possible de remplacer l'alternateur entraîné par une pompe, par un compresseur ou une soufflante.

II.1.1.4. Présentations du sujet

La durée de vie, la disponibilité et les coûts de maintenance sont trois paramètres clés aux quels les utilisateurs consacrent la plupart de leur attention. Une turbine à gaz, qui est un élément primaire de l'installation, exerce une influence directe sur ces paramètres. A centre production (SONATRACH) l'installation de traitement de gaz est parmi les complexes, qui permettent de récupérer, traiter, alimenter le circuit de réinjection et commercialiser le gaz grâce à la force motrice primaire qui est la turbine à gaz. Son arrêt ou sa défaillance entraîne l'arrêt total de l'usine de traitement du gaz. Il est donc nécessaire de formuler un plan correcte de maintenance basé sur des données statistiques, relevées à partir de l'historique de la turbine et prendre en considération d'autres facteurs principaux, comme par exemple les moyens locaux de maintenance et caractéristiques particulières de l'installation où la turbine à gaz fonctionne afin de vérifier l'état actuel de la turbine et l'influence des conditions climatiques sévères sur le rendement. Dans la finalité de faire des révisions et des améliorations pour rendre la machine apte à accomplir sa fonction requise avec le minimum de pannes donc assurer le maximum de production.

II.1.1.5. Présentation de la turbine à gaz

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

La turbine à double arbre atteint une puissance utile de 12,90 MW (e) ou de 14,32 MW (e) pour la production d'électricité et de 13,40 MW, soit 14,92 MW à entraînement mécanique. La turbine permet un rendement électrique de jusqu'à 35,4% pour un fonctionnement dans un cycle ouvert, une centrale électrique alimentée au gaz simple. Le SGT-400 est disponible comme un paquet assemblé en usine et a un excellent rapport des prestations.

La turbine à gaz se compose de deux roues turbines indépendants mécaniquement. La roue turbine HP (haut pression) entraîne le rotor du compresseur axial de la turbine elle-même, tandis que la roue BP (base pression) deuxième étage sert à entraîner la machine réceptrice.

Le but des roues turbines non reliés est de permettre aux deux roues de fonctionner à des vitesses différentes pour satisfaire aux exigences de charge variable de compresseur centrifuge.

La turbine à gaz est conçue avec quatre paliers ;

- ✓ Les paliers 1 et 2 supportent le rotor HP (haut pression).
- ✓ Les paliers 3 et 4 supportent le rotor BP (base pression).

La conception avec quatre paliers assure que les vitesses critiques des parties tournantes soit supérieur a la plage de vitesse de service de la turbine.

Les roues de la turbine sont refroidies par l'air extrait du deuxième étage du compresseur et par l'air de fuite d'étanchéité haute pression du compresseur.

II.1.1.6. Principe de fonctionnement

Une turbine à gaz fonctionne de la façon suivante :

- ✓ Elle extrait de l'air du milieu environnant.
- ✓ Elle le comprime à une pression plus élevée.
- ✓ Elle augmente le niveau d'énergie de l'air comprimé en ajoutant et en brûlant le combustible dans une chambre de combustion.
- ✓ Elle achemine l'air à pression et à température élevées vers la section de la turbine, qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique pour faire tourner l'arbre ; ceci sert, d'un côté, à fournir l'énergie utile à la machine conduite, couplée avec la machine au moyen d'un accouplement et, de l'autre côté à fournir l'énergie nécessaire pour la compression de l'air, qui a lieu dans un compresseur relié directement à la section turbine.
- ✓ Elle décharge à l'atmosphère les gaz d'échappement à basse pression et température

résultant de la transformation mentionnée ci-dessus.

II.1.1.7. Caractéristiques de la turbine à gaz

Vue d'ensemble

- ✓ Deux-arbre, industrielle.
- ✓ Transmission mécanique : 13.40 MW.
- ✓ Rendement de l'arbre : 36,2%.
- ✓ Le taux de chaleur : 9,943 kJ / kWh (7028 Btu / bhph).
- ✓ Pleine charge vitesse de la turbine de puissance : 8000 -10 000 tr/min.
- ✓ Taux de compression du compresseur : 16,8: 1.
- ✓ Débit de gaz d'échappement : 39,4 kg / s (86,8 lb / s).
- ✓ La température d'échappement : 555 ° C (1031 ° F).
- ✓ Les émissions typiques : NOx: <15 ppmV et CO: <10 ppm de volume (corrigé 15% O2 sec).
- ✓ La capacité des carburants de valeur à moyen calorifique (> 25 MJ / Nm3 Wobbe index).

Axial Compresseur

- ✓ Flux axiale conception du compresseur transsonique 11 Étages.

- ✓ Aube de guidage d'entrée variables ET stators.
- ✓ Rapport de pression: (ISO) 16,7: 1.
- ✓ Débit d'air: (ISO) 38,9 kg / s.
- ✓ Vitesse nominale: 14 100 tr / min. Combustion :
- ✓ 6 chambres inverses de tubulaires de combustion d'Écoulement.
- ✓ Dry Low Emissions (DLE) Combustion System.
- ✓ unique allumeur haute énergie Dans chaque chambre.
- ✓ Possibilité d'injection de vapeur verser Le Pouvoir augmentation.

Systeme de carburant

- ✓ Gaz naturel - liquide carburant - à double carburant.
- ✓ Combustibles Autres Capacité sur demande.

II.1.1.8. Principaux composants de la turbine

Les principaux composants d'une turbine à gaz sont :

- a. Section admission.
- b. Section compression.
- c. Section combustion (ensemble des chambres de combustion).
- d. Section turbine (HP et BP).
- e. Section échappement.
- f. La partie auxiliaire.

A. Section admission

Le corps d'admission se trouve à l'avant de la turbine à gaz, sa fonction principale est de diriger l'air de manière uniforme dans le compresseur. Les aubes variables de la directrice sont montées à l'arrière du corps d'admission. Le boîtier d'admission d'air est fixé au boîtier de palier d'entrée, tous deux conçus et en forme pour fournir un chemin lisse pour l'air entrant dans le compresseur. Une entrée l'écran et un joint flexible, qui reçoit en raison des mouvements relatifs de dilatation thermique, sont montés sur le point d'entrée boîtier rectangulaire à laquelle canalisation externe est connecté.

B. Section de compression

Les compresseurs axiaux sont utilisés dans les machines de grande puissance, à cause des grands débits qu'ils produisent, ces débits sont nécessaires pour produire des puissances utiles élevées avec des dimensions réduites. Les particules d'air, sont accélérées grâce à la rotation du rotor, où ces aubes offrent à ces particules une énergie cinétique ; en quittant l'étage rotor pour entamer l'étage stator suivant, une grande partie de l'énergie cinétique gagnée, se transforme en une énergie de pression à cause du freinage. Après avoir passé l'œil d'admission, L'air est dirigé par les aubes d'admission mobiles (IGV), pour pénétrer dans le premier étage du rotor. Le compresseur de la turbine à gaz comprend 11 étages

Le rôle du compresseur axial est essentiel, il se résume en :

- ✓ Assurer l'alimentation des chambres de combustion avec l'air comprimé, pour l'opération de combustion.
- ✓ Assurer un débit et une pression aussi élevée pour avoir une grande puissance utile.
- ✓ Assurer l'air utilisé pour le refroidissement des pièces exposées aux fortes contraintes thermiques et assurer l'étanchéité des paliers.

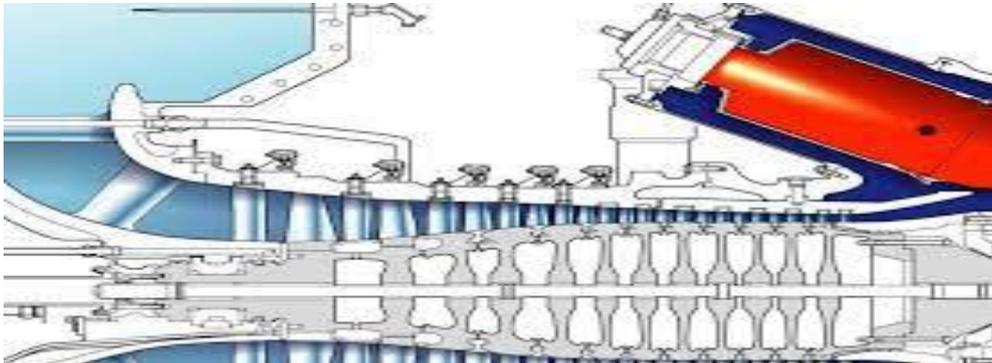


Figure II.1: Vue en coupe de la zone de la compression

C. Section de combustion

L'installation du système de combustion comporte six brûleurs, comprenant chacun un brûleur principal et un brûleur pilote et six chambres de combustion. Les brûleurs sont montés à la partie supérieure et les chambres de combustion sont à l'intérieur des carters de chambre de combustion positionnés de manière uniforme sur le carter central de la turbine. La partie supérieure de la chambre de combustion est assujettie sur le brûleur principal et la partie inférieure rainurée porte le segment de piston qui est situé dans la conduite de transition. Le brûleur assure une alimentation contrôlée en carburant sous une forme appropriée pour le bon fonctionnement du système de combustion.

L'accès est assuré à travers le col de la chambre à combustion pour l'injection du carburant dans le brûleur.

❖ Brûleurs de combustible

Le combustible est injecté dans le moteur via les brûleurs. Il peut s'agir de gaz ou de combustible liquide.

-Brûleurs DLE

Constitués de deux composants principaux : le brûleur pilote et le brûleur principal.

-Non DLE

Constitués uniquement d'un brûleur (MPI). Ces brûleurs séparés en tant que selon différentes configurations et différents types. Ils fonctionnent sur gaz combustible classique, combustible liquide, bicom bustible, et peuvent également injecter de l'eau et de la vapeur, etc.

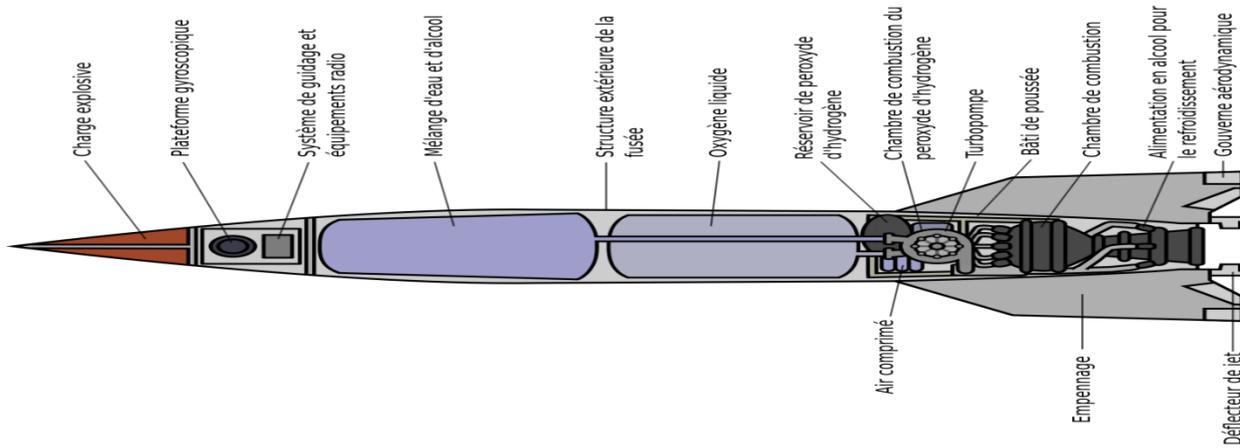


Figure II.2: Brûleurs de combustible

D. Section turbine (détente)

Les gaz chauds comprimés, entre dans la section de turbine dite aussi section de détente, pour céder une grande partie de leur énergie emmagasinée, ils trouvent dans leur trajectoire la première étage (première distributeur annulaire), son rôle est de diriger les gaz chauds sur les aubes de la première roue HP. Les gaz chauds est passé ver le deuxième distributeur annulaire, son rôle est de diriger les gaz chauds sur les aubes de la deuxième roue HP. Les trajectoire des gaz dans les roues HP est tangentielle au profil des intrados des aubes afin d'éviter les chocs (perte d'énergie) et d'avoir un couple résultant maximal. Les deux roues de turbine HP, se compose d'un ensemble d'aubes indépendantes les unes par rapport aux autres, elles ont une forme aérodynamique étudiée avec soin pour permettre de récupérer le maximum de couple; elles sont creuses afin de réduire leurs masses et les forces centrifuges qui peuvent aller jusqu'à l'arrachement de ces dernières. Les deux étages turbine du compresseur en porte à faux et sont refroidis par air.

Les roues HP est liée directement au rotor du compresseur axial, l'ensemble est souvent appelé rotor, la détente des gaz dans la roue HP fait tourner le compresseur axial (autonomie), ce rotor est supporté par deux paliers, palier du butée avant le compresseur et palier porteur avant la roue HP.

Une deuxième détente a lieu dans les roues BP. Les gaz sortant des roues HP traversent une première distributeur annulaire et le deuxième BP pour la conversion d'une partie de leurs énergies thermiques et de pression en une énergie cinétique servant à faire tourner les roues de turbine de puissance. Les deux arbres sont indépendants.

Du fait que les gaz ont perdus une partie de leur énergie après passage dans les roues HP, la deuxième roue de turbine est d'un diamètre plus grand, avec des aubes plus longues, pour maximiser la surface de contact (plus de couple). Les aubes sont soutenues des deux extrémités afin d'éviter leur Flexion.

Les gaz quittant la roue BP sont envoyés à l'échappement et, le couple résultant sert à faire tourner la charge qui est généralement variable dans ce cas ; la variation du ce couple est

assure par la variation au débit de fuel gaz et la quantité de l'air à l'aide des deux clapets de décharge (BOV). La deuxième roue est aussi supportée par deux paliers, un palier porteur après la roue et le deuxième palier de butée avant l'accouplement.

Un palier de butée pour résister contre la poussée axiale et limiter la position axiale du rotor pour éviter le frottement avec les pièces du stator lors de fonctionnement est placé du côté du premier palier porteur, il est de type à patins.

E. Section échappement :

Elle a pour fonction, l'expulsion vers l'atmosphère des gaz provenant de la détente dans les roues de la turbine.

II.1.1.8. Système-de-démarrage :

Le démarrage de la turbine à gaz est assuré par un système de démarrage hydrostatique à entraînement par boîte de vitesse à multiplicateur de vitesse et ensemble embrayage de sur pilotage. Le rotor de la turbine est accéléré à une vitesse à laquelle un combustible peut être introduit dans la combustion système et enflammé pour fournir l'auto accélération soutenue, à la normale vitesse de fonctionnement.

II.1.1.9. Système de lubrification et graissage d'huile :

Huile lubrifiante minérale est utilisée pour lubrifier et refroidir le tourillon de turbine et les paliers lisses et des butées, les roulements moteur et les unités auxiliaires roulements de boîte de vitesses d'engrenages et cannelures.

L'huile est aussi utilisée comme un liquide hydraulique pour faire fonctionner le départ hydraulique Système-lors-du-démarrage-de-la-turbine.

L'huile est délivrée à partir d'un réservoir de sur-dérapiage d'huile lubrifiante et distribué à travers le système de lubrification dans des conditions normales de fonctionnement par une pompe à huile principale.

Le système comprend trois pompes (auxiliaire, principale, et d'urgence) et une soupape de commande de température, de soupape de commande de pression, filtres, deux réchauffeurs et un refroidisseur.

Le système de contrôle enclenche la pompe auxiliaire lorsque la pompe de boîte d'engrenage principale est incapable de fournir une pression d'huile de lubrification suffisante (pendant le lancement et le ralentissement de la turbine).

II.1.1.10. Système d'air de refroidissement et d'étanchéité

L'air du compresseur est utilisé pour l'étanchéité des joints à labyrinthe et le refroidissement des composants à haute température.

L'air de pression moyenne, en provenance du dispositif de purge du septième étage du compresseur est utilisé pour :

- ✓ Pressuriser le joint à labyrinthe d'admission

✓ Pressuriser les joints à labyrinthe situés de part et d'autre du coussinet de la turbine de compresseur pour empêcher que l'air haute pression du dixième étage ne pénètre dans le logement de palier.

✓ Pressuriser les joints à labyrinthe de la TP et refroidir les disques de turbine.

L'air de purge haute pression de dixième étage en provenance de la section en amont de l'aube directrice de sortie du compresseur est utilisé pour :

✓ Refroidir les disques de rotor de turbine et le diaphragme intermédiaire.

✓ L'air haute pression est utilisé pour l'étanchéité du palier de sortie TC

✓ Utilisé pour refroidir les disques de rotor de TC, et les aubes de rotor de TC1 et TC2 par un système de convection à triple passage avant d'être refoulé dans le flux de gaz..

Réduction ou suppression des effets négatifs pour l'environnement

La [législation environnementale américaine](#) impose aux centrales hydroélectriques de réduire la mortalité des poissons qui traversent les turbines. Pour cela le [Laboratoire national de l'Idaho](#) a mis en place un programme « Hydro power »³ de développement de turbines « vertes » à technologies avancées (Advanced Turbine Systems et Advanced Technology Turbines, ou ATT), avec comme objectif de maximiser l'utilisation des ressources hydroélectriques « en améliorant ses avantages techniques, sociétaux et environnementaux » tout en réduisant ses coûts et autant que techniquement possible les effets sur l'environnement. Ce programme visait à faire chuter les blessures et mortalités de poissons traversant les turbines à 2 % ou moins (contre 5 à 10 % pour les meilleures turbines existant au début du programme) et des taux atteignant 30 % voire plus avec les autres turbines⁴. Ce laboratoire s'est ainsi spécialisé dans la modélisation des effets des centrales sur les poissons, notamment grâce à une « sonde-poisson » (une sorte de simulacre de poisson contenant des capteurs mesurant les contraintes subies lors du passage dans différents types de turbines, sous diverses conditions de vitesse de turbine, de courant d'eau et de pression⁵). Le labo conduit parallèlement des tests in situ sur la survie cumulée des [salmonidés](#) ou anguilles passant par de multiples turbines. Les retours d'expérience alimentent les études de configuration de nouveaux types de turbines visant à supprimer les impacts des turbines sur les poissons, et produire de l'électricité sur des chutes de moindre hauteur.

Ainsi des modèles de « fish-friendly turbines » ont été proposés en 2000-2005, avec 83 à 93 % de survie après 96 h pour les truites arc-en-ciel, 90 à 100 % de survie pour les autres espèces selon ALDEN en 2009^{6,7,8,9} (et testé en 2006), dit « très basse chute » (VLH®2) et « ichtyophile®2 », qui présente comme avantage de fortement diminuer le besoin en [génie civil](#) et donc les coûts de travaux, pour une efficacité qui permet d'équiper des très basses chutes (2 à 3 m) ; tout en permettant le passage des poissons sans dommage à travers la turbine (anguilles notamment) grâce à une conception intégrant les résultats d'études de compatibilité des turbines avec la vie des poissons, faites par l'[U.S. Army Corps of Engineers](#), publiés en 1995¹⁰. Le premier prototype de turbine VLH construit en France l'a été en mars 2007 (sur le [Tarn](#), au

Moulin de Troussy à [Millau](#))^{11,12}. Les prises d'eau de ces turbines peuvent en outre aussi être équipées de dispositifs dits d'ichtyocompatibilité (par exemple en France testé à [Navarrenx](#) sur le [Gave d'Oloron](#)) et améliorés avec l'[ONEMA](#)^{13,14}. (Larinier, Thévenet, & Travade, 2008)¹⁵, et une échelle à poissons peut leur être associée pour faciliter la remontée (comme sur la centrale de Saint-Géry (2 MW) dans le Lot, rénovée en 2015¹⁶). Dans les pires conditions les impacts en termes de mortalité immédiate et/ou différée sont divisés par 2 à 3 par rapport à une turbine Kaplan classique fonctionnant dans les mêmes conditions. Les anguilles sont les plus vulnérables en raison de leur longueur et quand elles sont tuées, c'est souvent en sortie de turbine¹⁷.

II.1.2. Turbines à vapeur:

II.1.2.1. Définition:

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

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

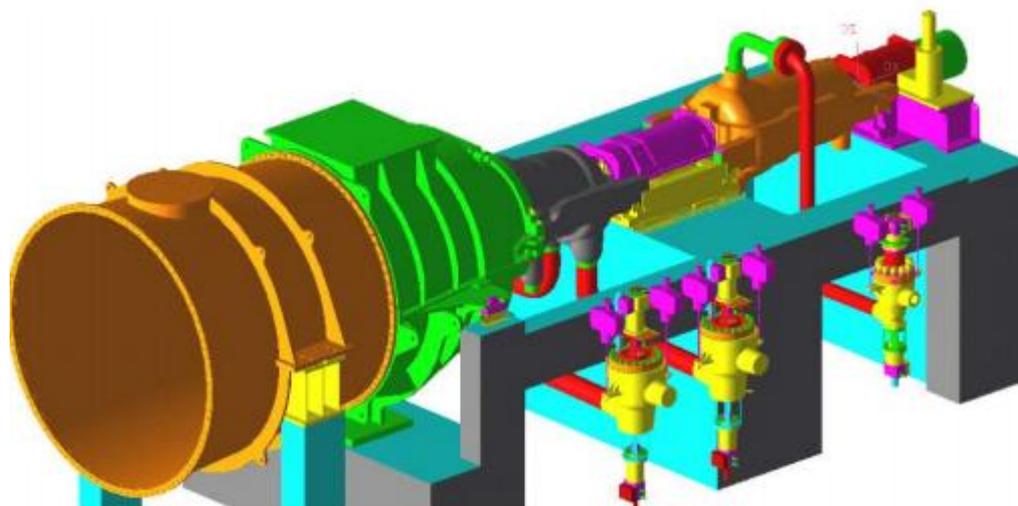


Figure II.3: Turbines à vapeur

II.1.2.2. Historique des turbines à vapeur

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

- Les tuyères dans lesquelles la vapeur se dilate, engendrant une diminution de sa température et une augmentation de son énergie cinétique.
- Les ailettes fixes et mobiles.

- Un rotor sur lequel sont montées les roues portant les ailettes fixes ou mobiles. Les turbines à vapeur sont largement utilisées dans plusieurs domaines, parmi lesquelles on cite :
- La production d'électricité à partir de l'énergie thermique.
- La propulsion navale.



Figure II .4 : la turbine à vapeur

II.1.2.3. Principe d'une turbine à vapeur

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

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

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

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



Figure II.5 : Rotor d'une turbine à vapeur

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

II.1.2.4. Utilisation des turbines à vapeur dans l'industrie

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

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

II.1.2.5. Spécification des turbines nucléaires

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

II.1.2.6. Réalisation de turbine à vapeur

La réalisation des turbines nécessite le recours à des aciers fortement alliés (Cr-Ni-Va) pour résister aux contraintes thermiques, mécaniques (force centrifuge) et chimique (corrosion par la vapeur). Les deux premières contraintes limitent le diamètre et donc le débit capable des derniers étages. Ainsi des aubes de plus d'un mètre de longueur posent déjà de sérieux problèmes de réalisation. De plus, l'hétérogénéité radiale des vitesses impose une incidence variable de l'aube qui présente alors une forme gauche dont l'usinage est complexe.

En pratique la température est limitée à 550 ou 580°C et le maximum mis en œuvre est de 650°C. La pression est de l'ordre de 180 bars et atteint 250 bars pour les installations supercritiques. De ce fait, les turbines de forte puissance comprennent généralement sur un même axe :

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

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

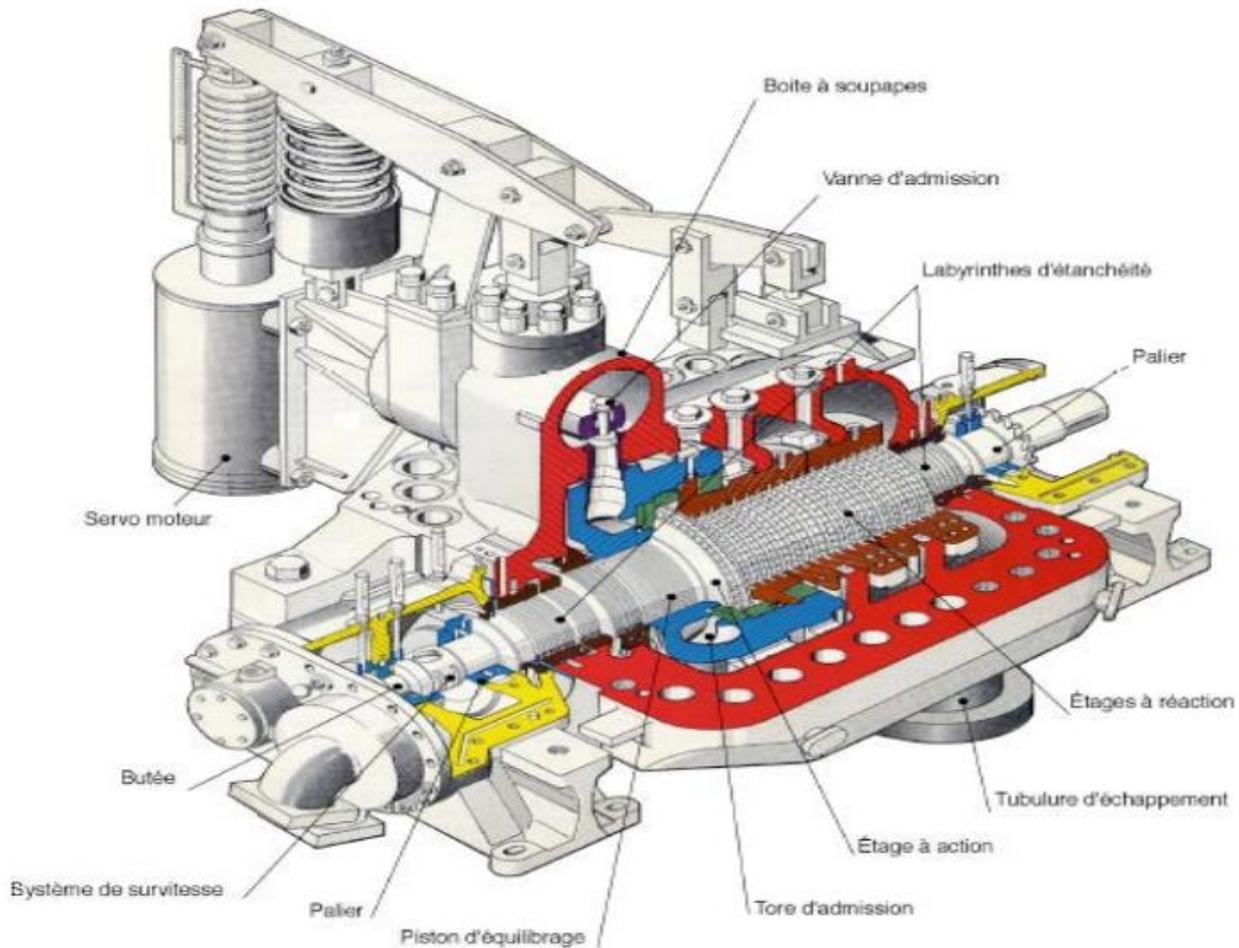


Figure II.6: turbine à vapeur à réaction.

II.1.2.7. Classification des turbines à vapeur

On a plusieurs critères pour la classification de la turbine à vapeur [9] :

1. selon l'utilisation

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

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

2. Selon la forme de la veine de vapeur

a-Turbine axiale:

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

b-Turbine radiale:

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

3. Par le nombre d'étages de rotor

-Turbine élémentaire ou à une seule roue ou mono étagée.

-Turbines à éléments multiples ou à plusieurs roues ou multi étagée.

4. Par le mode d'action

a- Turbine à action:

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

b- Turbine à réaction :

Dans laquelle la détente se fait dans les canaux fixes et les canaux mobiles, Le rotor se présente en générale sous la forme d'un tambour sur lequel sont fixées les aubes mobiles.

Généralement, les derniers étages de la turbine multicellulaire à action sont à réaction.

5. selon le mode de construction

a- turbine à un corps:

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

b- turbine à plusieurs corps:

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

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

II.1.3. Comparaison avec la turbine à gaz

Nous allons faire dans cette partie une comparaison entre la turbine à gaz(TAG) et la turbine à vapeur (TAV) de point de vue thermodynamique et construction technologique [10].

1-Comparaison de point de vue thermodynamique

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

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

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

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

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

La différence de température et pression maximale, puissance générée et rendement entre la turbine à gaz et celle à vapeur sont résumées dans le tableau suivant [11]:

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

	T.max(c°)	P.max(bar)	Puissance(MW)
Turbine à gaz	1300	12	Jusqu' à 300
Turbine à vapeur	550	65	Jusqu' à 1400

2. Comparaison de point de vue technologique:

Les turbine à gaz diffèrent des turbines à vapeur par :

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

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

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

Ainsi lorsque l'énergie mécanique est produite à l'aide d'une turbine à vapeur, les produits de la combustion ne décrivent pas un cycle thermodynamique, il ne fournit pas directement de travail, mais après avoir cédé la plus grande parties de leur chaleur à l'eau et sa vapeur, sont rejetés à l'atmosphère où ils se refroidissent

jusqu'à la température ambiante. Cette transmission de la chaleur des gaz au fluide moteur est réalisée à l'aide des échangeurs constitués par les tubes de la chaudière, de la surchauffeur de vapeur et de l'économiseur. La présence de tous ces échangeurs augmente notablement l'encombrement et le prix de l'installation.

Une telle séparation entre les fluides chauffant et les fluides chauffés par des surfaces d'échange disparaissent complètement dans une turbine à gaz à circuit ouvert ; la combustion est réalisée sous une pression supérieure à celle de l'atmosphère, et ce sont les produits de la combustion eux-mêmes qui servent de fluide moteur.

Tableau II.2 : comparaison entre turbine à gaz et turbine à vapeur (matériaux et fonctionnement).

	Turbine à vapeur	Turbine à gaz
Matériaux	<u>Tuyères:</u> 1- acier au Mn(C 0,35;Mn 2%). 2-acier au Cr Mo Cr (C 0,2; Cr13 ; M 0,1). 3-acier au Cr Ni W (Cr 18 inoxydable). 4-acier à 14% de Cr. <u>Rotors et disques:</u> Acier qui contient généralement 1,5% de Cr ; 0,4% de Mo; 1% de Mn	<u>Aubes mobiles:</u> 1-super alliages à base de nickel renforcés par durcissement et traitement thermiques. GTD-111. 2-les éléments critiques (Cr, Mo, Co, Al, W et Ta) <u>Les étages:</u> ailettage à base de cobalt GTD-222
Encombrement	Elle comporte une chaudière, un condenseur, turbopompe alimentaire et d'extraction. ainsi qu'un dégazeur.	Un seul compartiment qui contient toutes les éléments.
Démarrage	Il nous faut au moins l'heure 30minute pour la démarrer. sans tenir compte le temps de démarrage de la chaudière	Démarrage rapide 9 minutes, démarrage normal 21 minutes.

Introduction

La turbine à gaz a connu ces dernières années un développement considérable dans des nombreuses applications dans l'industrie des hydrocarbures et en particulier dans le domaine du transport du gaz et de production d'électricité, elle offre une grande souplesse d'exploitation.

La turbine à gaz est une machine thermique à flux continu, réalisant différentes transformations thermodynamiques, dans une succession d'organes comportant un compresseur et une turbine couplée mécaniquement sur un arbre, et une chambre de combustion intercalée entre ces deux derniers, ce qui permet de produire, de l'énergie contenu dans le combustible, une énergie mécanique utilisable sur l'arbre de la turbine, il aspire donc de l'air ambiant et rejette des gaz brûlés à l'atmosphère.

La demande d'énergie ne cesse de croître, alors que les ressources deviennent chères, il est donc nécessaire d'améliorer les performances techniques des turbines et évoluer leur rendement thermique de manière à réguler les coûts d'investissement, la pression et le débit sont les paramètres les plus influés sur ces performances et ce rendement et comme la turbine à un seul arbre, tourne à une vitesse constante et entraîne donc une charge stable (générateur) avec un rendement fiable, ne peut pas entraîner des charges variables (compresseur centrifuge).

Les derniers développements des alliages entrés dans la fabrication des métaux des turbines n'ont pas pu résister avec la température d'allumage dans la turbine qui peut atteindre 1370°C , d'où vient la conception d'une turbine à deux arbres et avec des aubes variables entre les deux roues de la turbine et devient une solution pour répondre aux charges variables d'une part et contrôler la vitesse de compresseur axial (l'arbre HP) et contrôler la température d'autre part [1].

III.1. La turbine à gaz :

III .1.1. Définition:

La turbine à gaz est une machine thermique qui appartient à la famille des moteurs à combustion interne. Elle permet de transférer l'énergie thermique en énergie mécanique par l'entraînement en rotation d'un arbre lui-même couplé à une machine industrielle ou à une hélice, ou bien de l'énergie cinétique par détente des gaz en sortie de la turbine dans une tuyère (Turbo réacteur). Généralement, les turbines à gaz se répartissent en deux classes :

- ✓ les turbomoteurs fournissant de l'énergie mécanique disponible sur un arbre.
- ✓ les turboréacteurs fournissant de l'énergie cinétique utilisable pour la propulsion.

La turbine à gaz peut être considérée comme un système autosuffisant. Le compresseur aspire et comprime l'air. L'air comprimé entre au chambre de combustion pour augmenter sa puissance énergétique, pour convertir, en suite, cette puissance en énergie mécanique utile pendant les processus de détente qui a lieu dans la section turbine. L'énergie mécanique qui en résulte est transmise par l'intermédiaire d'un accouplement à une machine réceptrice, qui produit la puissance utile pour le processus industriel

Une turbine à gaz, appelée aussi turbine à combustion, est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique (rotation d'un arbre) à partir de l'énergie contenue dans un hydrocarbure (fuel, gaz...)

III.1.2. Classification des turbines à gaz :

III.1.2. 1. Par le mode de construction :

L'objectif pour lequel, on utilise la turbine à gaz définit le type qu'on doit choisir. Dans l'industrie, on trouve les turbines à un seul arbre, dites aussi mono-arbre. Elles sont généralement utilisées dans le cas où on cherche un fonctionnement avec une charge constante (pour entraîner les générateurs d'électricité). Un deuxième type, englobe les turbines à deux arbres bi-arbres; elles ont l'avantage d'entraîner des appareils à charges variables (pompes, compresseur,...). Elles se composent de deux parties, la première assure l'autonomie de la turbine, la deuxième est liée à la charge. Un troisième type peut être aussi cité, ce sont les turbines dites dérivées de l'aéronautique; Elles ont une conception spéciale suivant le domaine dans lequel elles sont utilisées. Dans ce troisième type, la partie qui assure l'autonomie de la turbine existe toujours, et l'énergie encore emmagasinée dans les gaz d'échappement est utilisée pour créer la poussée, en transformant cette énergie (thermique et de pression) en une énergie cinétique de jet dans une tuyère.

A. Turbine mono-arbre :

Le compresseur et les sections de la turbine de ces machines se composent d'un seul rotor simple, où la turbine produit l'énergie pour entraîner le compresseur ainsi que l'énergie pour entraîner la charge. Les turbines à un seul arbre sont favorables dans le cas où la charge est constante. Les turbines à gaz à un seul arbre sont aptes à l'entraînement des machines qui fonctionnent à vitesse constante. Telle que les alternateurs et, pour cette raison, sont employées dans la génération d'énergie électrique.

CO : Compresseur axial.

CC : Chambre de combustion.

T : Turbine.

CH : Charge.

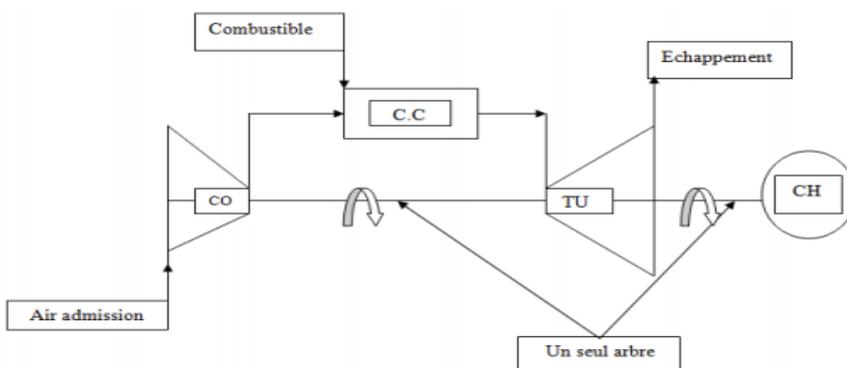


Figure III.1: Schéma d'une turbine à gaz mono-arbre.

B. Turbine bi-arbre :

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

entraîner l'organe récepteur (ex : les compresseurs). Le but des roues turbines non reliés est de permettre aux deux roues de fonctionner à des vitesses différentes pour satisfaire aux exigences de charge variable de l'organe récepteur.

CO : Compresseur axial.

CC : Chambre de combustion.

Thp : Turbine à haute pression.

Tbp : Turbin à basse pression.

N : Réducteur.

CH : Charge

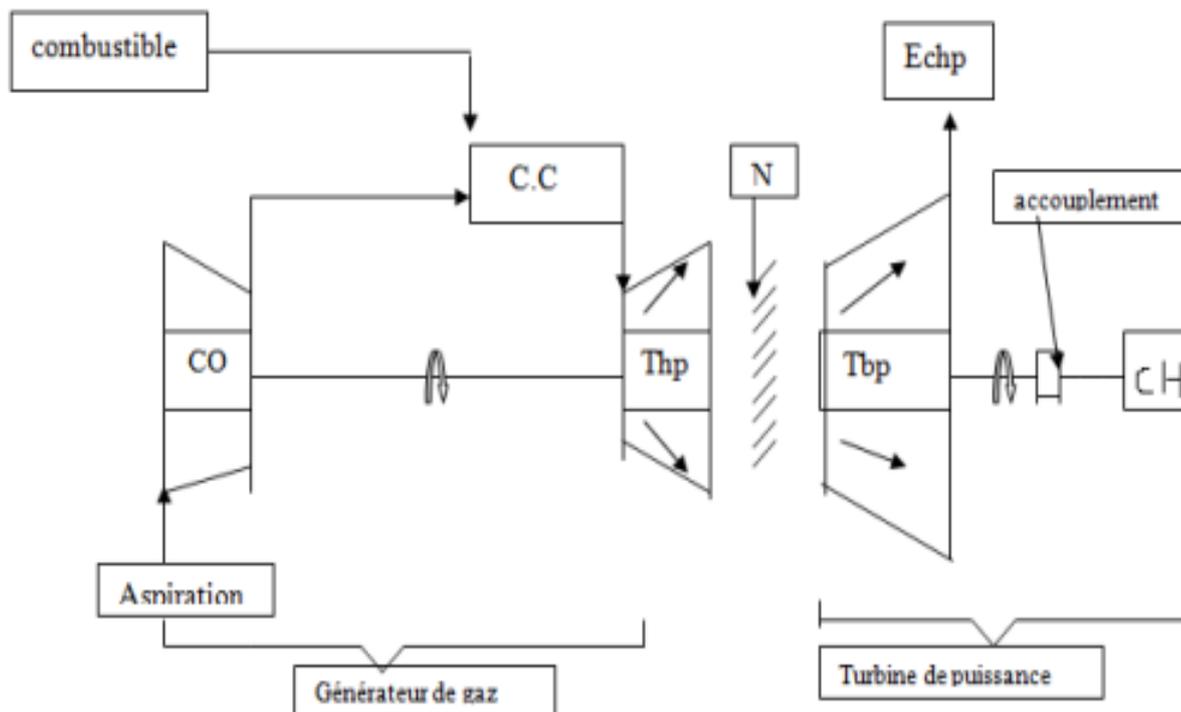


Figure III.2: Schéma d'une turbine à gaz bi-arbre.

II.1.2. 2. Par le mode de travail :

On distingue deux types de turbine:

❖ Turbine à action:

Où l'énergie thermique est transformée complètement en énergie cinétique dans la directrice. L'évolution des gaz dans la roue se fait sans variation de pression statique $P_1 > P_2 = P_3$.

❖ Turbine à réaction:

Une partie de l'énergie thermique est transformée dans la roue en énergie cinétique et mécanique. L'évolution des gaz dans la roue se fait avec variation de la pression statique $P_1 > P_2 > P_3$. Le taux de réaction ϵ caractérisera le % d'énergie thermique totale.

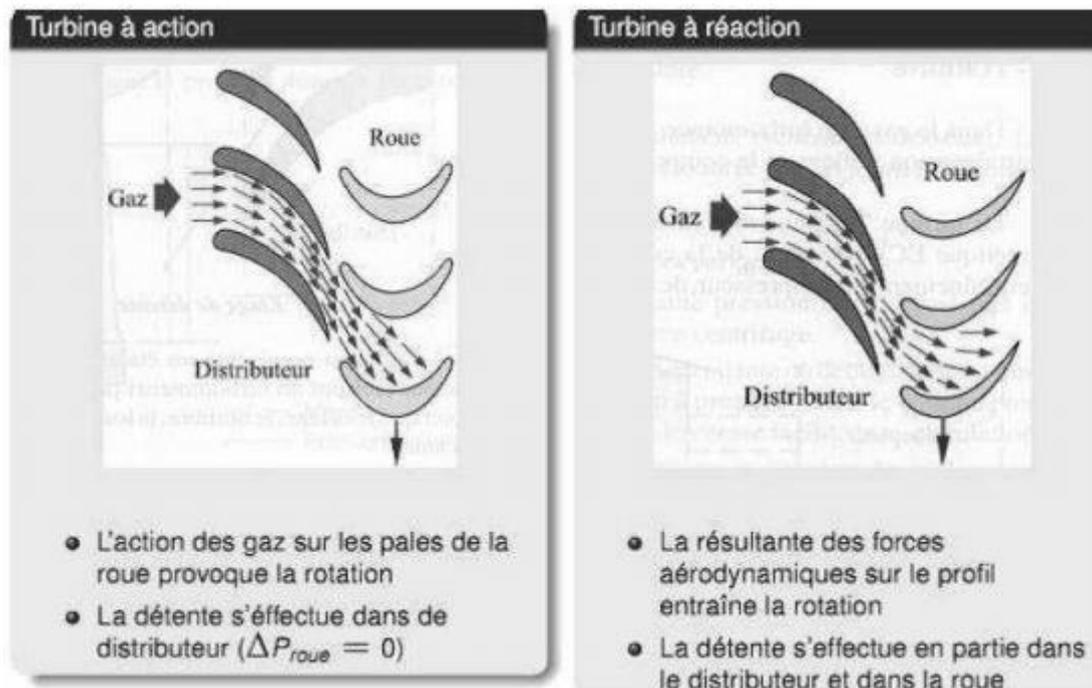


Figure III.3: Schéma d'une turbine à action et à réaction.

III.1.2.3. Par le mode de fonctionnement thermodynamique:

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

Il existe deux cycles thermodynamiques:

- ❖ **Turbine à gaz à cycle fermé** : dans laquelle le même fluide est repris après chaque cycle.
- ❖ **Turbine à gaz à cycle ouvert** : c'est une turbine dont l'aspiration et l'échappement effectuent directement dans l'atmosphère. Ce type de turbine qui est le plus répandu se divise en deux classes:
 - ❖ **Turbine à cycle simple**: c'est une turbine utilisant un seul fluide pour la production d'énergie mécanique après la détente les gaz possédant encore un potentiel énergétique sont perdus dans l'atmosphère à travers la cheminée.
 - ❖ **Turbine à cycle régénéré**: Les pertes de chaleur causées par les gaz d'échappement sont les plus importantes dans l'installation de turbine à gaz. Pour cela le rendement des installations de turbine à gaz peut être augmenté, en conduisant les gaz d'échappement dans un échangeur thermique où ils réchauffent l'air sortant du compresseur avant son entrée dans les chambres de combustion. On récupère une partie de chaleur sensible de ces gaz qui se trouvait perdue dans l'atmosphère. [6]

De nos jours la turbine à gaz connaît une large utilisation et dans différents domaines et en particulier dans le domaine des hydrocarbures à cause de leur grande gamme de puissance et leurs propres avantages.

III.1.3 Principe d'application:

Chaque cas d'application d'une turbine à gaz comprend un nombre important de paramètres de définitions spécifiques : type de combustible, durée de fonctionnement par an, températures extérieures extrêmes, montage, nuisances, etc. Il en résulte qu'une installation de turbine à gaz doit être personnalisée afin de répondre aux conditions d'exploitation envisagées.

Étudions tout d'abord les utilisations principales avant de passer en revue, au paragraphe suivant, les critères servant de base de réflexion pour choisir le dimensionnement d'une installation.

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

❖ **Appareils fixes :**

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

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

❖ **Appareils mobiles :**

Du point de vue historique, ces appareils ont été introduits en premier. Ils comprennent les domaines suivants:

- Chemins de fer.
- Propulsion maritime.
- Aviation.
- Traction routière.

Les applications des turbines à gaz découlent directement de leurs avantages spécifiques. Ainsi, la puissance massique élevée se prête bien à la propulsion aéronautique en particulier sur les hélicoptères. La propulsion navale fait également de plus en plus appel aux turbines à gaz notamment pour les navires à grande vitesse. Il existe enfin des exemples d'application à la propulsion ferroviaire et à des véhicules militaires comme des chars d'assaut (XM-1 Abrams ou Leclerc)

III.1.3.1. Utilisation des turbines à gaz pour la propulsion :

L'utilisation de la turbine à gaz dans l'aviation (avions, hélicoptères) est bien connue. Dans le domaine des transports civils et militaires, les turbines à gaz sont également utilisées pour la propulsion, car elles permettent d'obtenir de grandes puissances avec des poids et dimensions faibles par rapport à ceux des moteurs diesels.

III.1.3.2. Production combinée chaleur-force:

Ce type d'application permet d'économiser les dépenses d'énergies. Le couple de force peut servir à l'entraînement d'une machine réceptrice et la chaleur peut servir pour le chauffage, séchage, production de vapeur pour un process industriel. Le principe de cette application peut être, encore poussé plus loin pour obtenir des installations industrielles dites à énergie totale où la turbine à gaz peut fournir simultanément

trois formes d'énergie : électrique (alternateur), pneumatique (par prélèvement d'air sur le compresseur), calorifique (récupérateur de chaleur des gaz d'échappement). Le rendement de telles installations est ainsi fortement revalorisé et peut atteindre 50 à 60%.

III.1.3.3. Production d'électricité :

Cette application est extrêmement courante : l'arbre de la turbine entraîne un réducteur dont l'arbre à petite vitesse entraîne un alternateur. Le système mécanique est simple et peut être comparé à un groupe turboalternateur à vapeur. Produire uniquement de l'électricité avec une turbine à gaz n'est intéressant que pour des conditions d'exploitation imposant ce système.

Dans tous les types d'applications étudiés, il est tout à fait possible de remplacer l'alternateur entraîné par une pompe, par un compresseur ou une soufflante.

III.1.4. Présentations du sujet: [3,4]

La durée de vie, la disponibilité et les coûts de maintenance sont trois paramètres clés aux quels les utilisateurs consacrent la plupart de leur attention. Une turbine à gaz, qui est un élément primaire de l'installation, exerce une influence directe sur ces paramètres. A centre production (SONATRACH) l'installation de traitement de gaz est parmi les complexes, qui permettent de récupérer, traiter, alimenter le circuit de réinjection et commercialiser le gaz grâce à la force motrice primaire qui est la turbine à gaz. Son arrêt ou sa défaillance entraîne l'arrêt total de l'usine de traitement du gaz. Il est donc nécessaire de formuler un plan correcte de maintenance basé sur des données statistiques, relevées à partir de l'historique de la turbine et prendre en considération d'autres facteurs principaux, comme par exemple les moyens locaux de maintenance et caractéristiques particulières de l'installation où la turbine à gaz fonctionne afin de vérifier l'état actuel de la turbine et l'influence des conditions climatiques sévères sur le rendement. Dans la finalité de faire des révisions et des améliorations pour rendre la machine apte à accomplir sa fonction requise avec le minimum de pannes donc assurer le maximum de production.

III.1.4.1. Présentation de la turbine à gaz:

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

La turbine à double arbre atteint une puissance utile de 12,90 MW (e) ou de 14,32 MW (e) pour la production d'électricité et de 13,40 MW, soit 14,92 MW à entraînement mécanique. La turbine permet un rendement électrique de jusqu'à 35,4% pour un fonctionnement dans un cycle ouvert, une centrale électrique alimentée au gaz simple.

La turbine à gaz se compose de deux roues turbines indépendants mécaniquement. La roue turbine HP (haut pression) entraîne le rotor du compresseur axial de la turbine elle même, tandis que la roue BP (base pression) deuxième étage sert à entraîner la machine réceptrice .

Le but des roues turbines non reliés est de permettre aux deux roues de fonctionner à des vitesses différentes pour satisfaire aux exigences de charge variable de compresseur centrifuge.

La turbine à gaz est conçue avec quatre paliers ;

- ✓ Les paliers 1 et 2 supportent le rotor HP (haut pression).
- ✓ Les paliers 3 et 4 supportent le rotor BP (base pression).

La conception avec quatre paliers assure que les vitesses critiques des parties tournantes soit supérieur a la plage de vitesse de service de la turbine.

Les roues de la turbine sont refroidies par l'air extrait du deuxième étage du compresseur et par l'air de fuite d'étanchéité haute pression du compresseur.



Figure III.4 : Présentation de la turbine à gaz.

III.1.4.2. Principe de fonctionnement :

La turbine à gaz transforme l'énergie de combustion d'un mélange combustible air comprimé (sous forme d'une chaleur) à un mouvement mécanique, les turbines à gaz fonctionnent généralement de cette façon :La rotation de compresseur axial aspire de l'air du milieu environnant à travers le filtre d'air et le comprime par les séries des étages puis cet air comprimé se mixe avec le gaz chaud dans les chambres de combustion et le mélange combustible air se brule en augmentant leur température. Le gaz à une pression et une

température plus élevée se détente vers les roues de la turbine et force ces roues à tourner et il résulte donc une énergie mécanique à partir d'une énergie thermique et le gaz chaud se dépressurise et se décharge vers l'atmosphère.

Une quantité d'énergie mécanique résultante, généralement 30% environ de l'énergie totale produise, sert à entrainer la charge tandis que la quantité d'énergie restante sert à entrainer le compresseur axial et les accessoires de la turbine. [3]

Une turbine à gaz fonctionne de la façon suivante :

- ✓ Elle extrait de l'air du milieu environnant.
- ✓ Elle le comprime à une pression plus élevée.
- ✓ Elle augmente le niveau d'énergie de l'air comprimé en ajoutant et en brûlant le combustible dans une chambre de combustion.
- ✓ Elle achemine l'air à pression et à température élevées vers la section de la turbine, qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique pour faire tourner l'arbre ; ceci sert, d'un côté, à fournir l'énergie utile à la machine conduite, couplée avec la machine au moyen d'un accouplement et, de l'autre côté à fournir l'énergie nécessaire pour la compression de l'air, qui a lieu dans un compresseur relié directement à la section turbine.
- ✓ Elle décharge à l'atmosphère les gaz d'échappement à basse pression et température résultant de la transformation mentionnée ci-dessus.

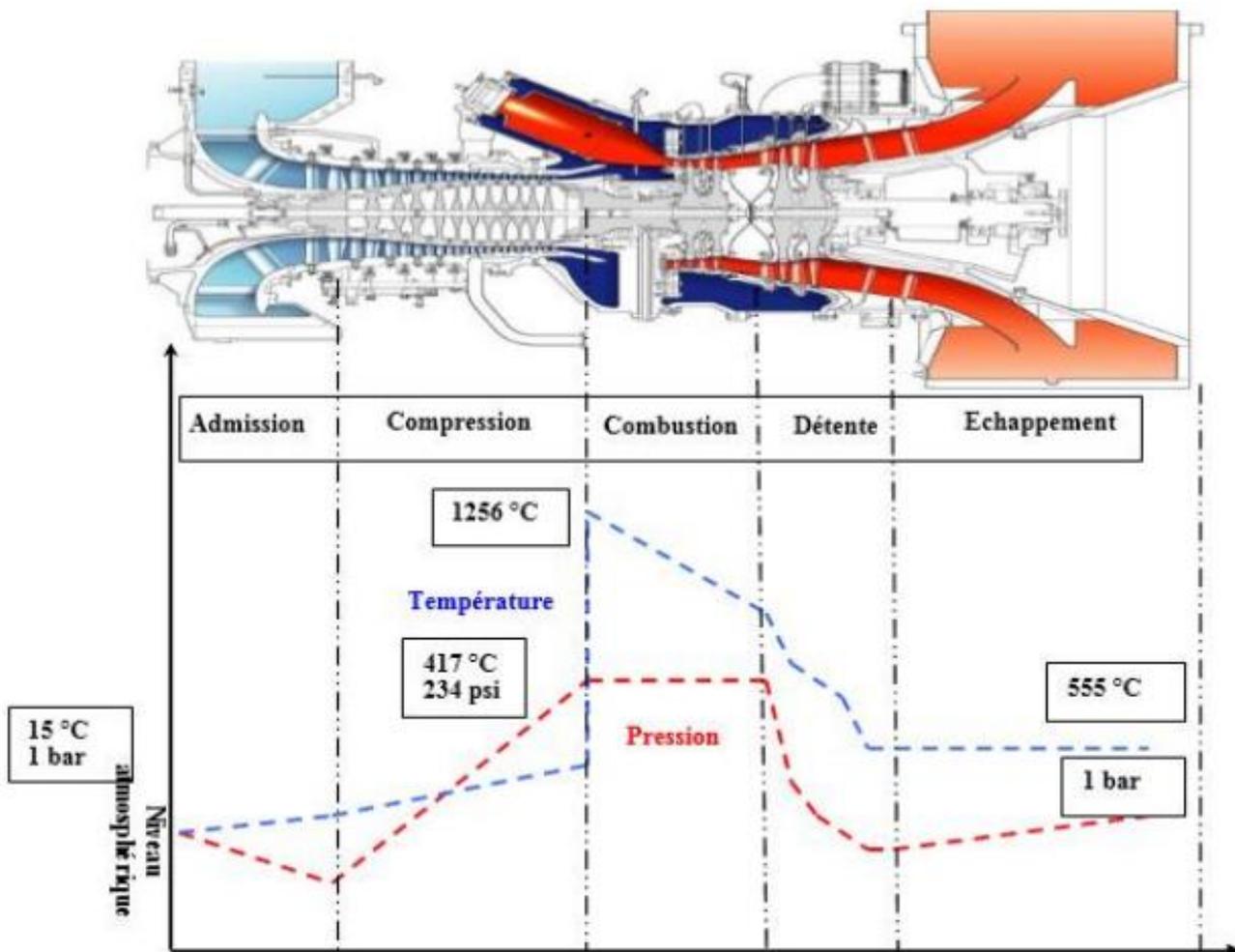


Figure III.5: La variation de pression et température dans une turbine à gaz

III.1.4.3. Caractéristiques de la turbine à gaz:

Vue d'ensemble :

- ✓ Deux-arbre, industrielle.
- ✓ Transmission mécanique : 13.40 MW.
- ✓ Rendement de l'arbre : 36,2%.
- ✓ Le taux de chaleur : 9,943 kJ / kWh (7028 Btu / bhph).
- ✓ Pleine charge vitesse de la turbine de puissance : 8000 -10 000 tr/min.
- ✓ Taux de compression du compresseur : 16,8: 1.
- ✓ Débit de gaz d'échappement : 39,4 kg / s (86,8 lb / s).
- ✓ La température d'échappement : 555 ° C (1031 ° F).
- ✓ Les émissions typiques : NOx: <15 ppmV et CO: <10 ppm de volume (corrigé 15% O₂ sec).
- ✓ La capacité des carburants de valeur à moyen calorifique (> 25 MJ / Nm³ Wobbe index).

Axial Compresseur :

- ✓ Flux axiale conception du compresseur transsonique 16 Étages.
- ✓ Aube de guidage d'entrée variables ET stators.
- ✓ Rapport de pression: (ISO) 16,7: 1.
- ✓ Débit d'air: (ISO) 38,9 kg/s.
- ✓ Vitesse nominale: 14 100 tr/min. Combustion :
- ✓ 6 chambres inverses de tubulaires de combustion d'Écoulement.
- ✓ Dry Low Emissions (DLE) Combustion System.
- ✓ unique allumeur haute énergie Dans chaque chambre.
- ✓ Possibilité d'injection de vapeur verser Le Pouvoir augmentation.

Système de carburant :

- ✓ Gaz naturel - liquide carburant - à double carburant.
- ✓ Combustibles Autres Capacité sur demande.

III.1.4.4. Principaux composants de la turbine : (Figure III.6) [5]

Les principaux composants d'une turbine à gaz sont :

- a. Section admission.
- b. Section compression.
- c. Section combustion (ensemble des chambres de combustion).
- d. Section turbine (HP et BP).
- e. Section échappement.
- f. La partie auxiliaire.

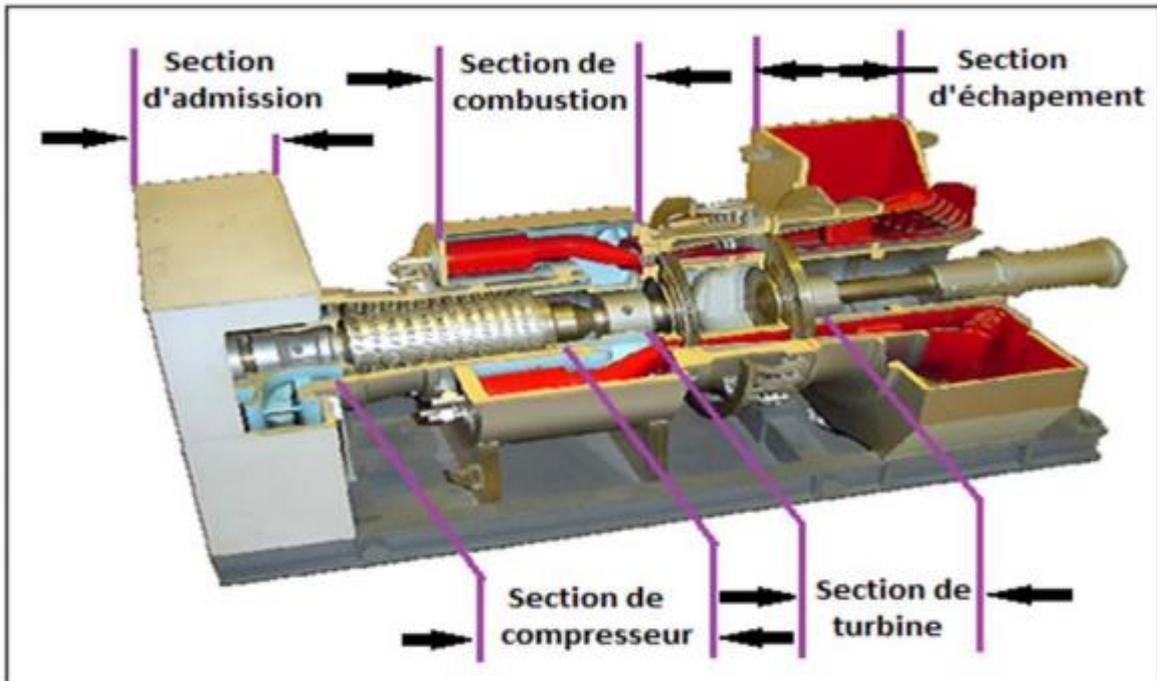


Figure III.6: Principaux composants de la turbine.

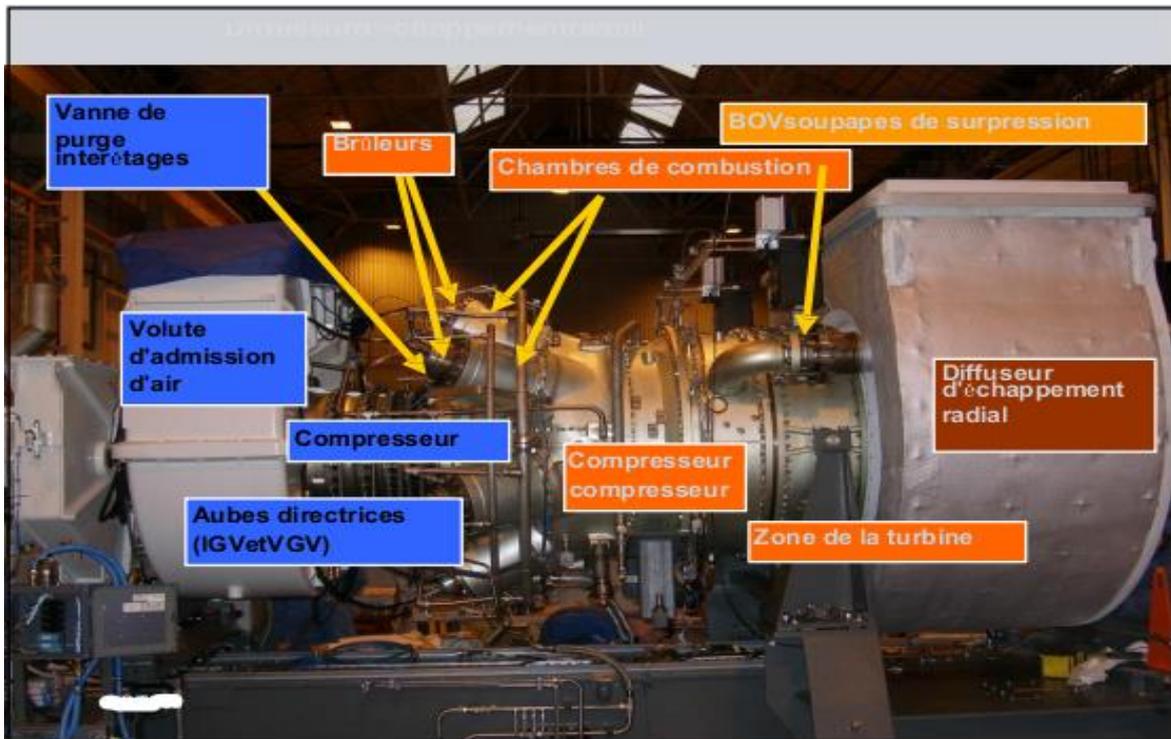


Figure III.7: Schéma des sections de la turbine à gaz

A. Section admission

L'aspiration de la turbine est une enceinte ou compartiment qui abrite les filtres, la conduite, le silencieux, le coude, le caisson d'admission et d'autres accessoires. Ce système regroupe les fonctions de filtrage et de réduction de bruit à celle de direction de l'air dans le compresseur de la turbine. Ce compartiment est muni de portes pour un accès facile aux filtres pour les besoins de maintenance. [7]

Les filtres minimisent au maximum la quantité de la poussière et d'humidité de l'air, les filtres ont des pompes d'aspiration et protégés contre la surpression par des portes by passe.

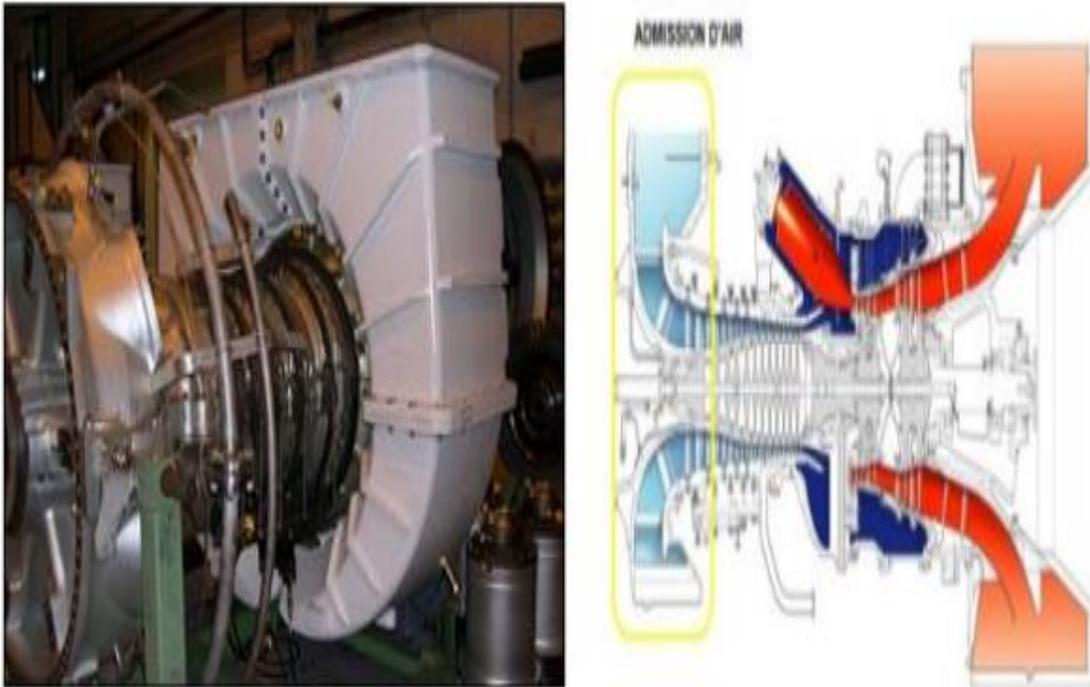


Figure III.8: Section admission d'une turbine

B. Section de compression

Les compresseurs axiaux sont utilisés dans les machines de grande puissance, à cause des grands débits qu'ils produisent, ces débits sont nécessaires pour produire des puissances utiles élevées avec des dimensions réduites. Les particules d'air, sont accélérées grâce à la rotation du rotor, où ces aubes offrent à ces particules une énergie cinétique ; en quittant l'étage rotor pour entamer l'étage stator suivant, une grande partie de l'énergie cinétique gagnée, se transforme en une énergie de pression à cause du freinage. Après avoir passé l'œil d'admission, L'air est dirigé par les aubes d'admission mobiles (IGV), pour pénétrer dans le premier étage du rotor. Le compresseur de la turbine à gaz comprend 16 étages

Le rôle du compresseur axial est essentiel, il se résume en :

- ✓ Assurer l'alimentation des chambres de combustion avec l'air comprimé, pour l'opération de combustion.
- ✓ Assurer un débit et une pression aussi élevé pour avoir une grande puissance utile.
- ✓ Assurer l'air utilisé pour le refroidissement des pièces exposées aux fortes contraintes thermiques et assurer étanchéité des palies.

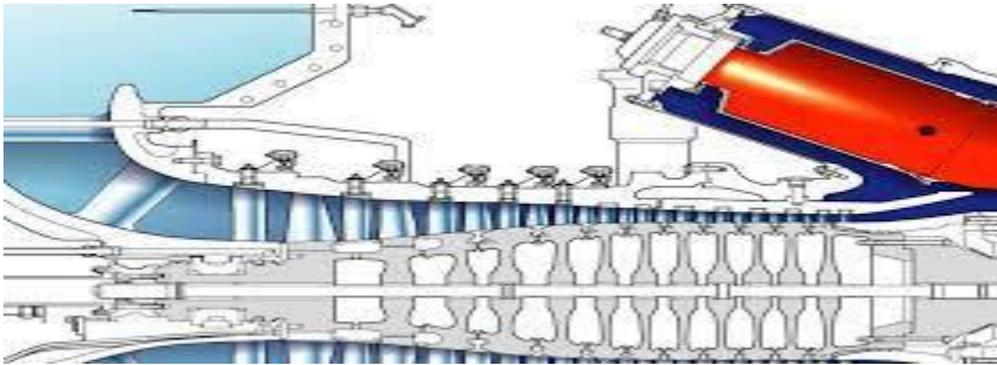


Figure III.9: Vue en coupe de la zone de la compression

Le compresseur comprime l'air venant des filtres pour combustion et refroidissement par réduction de son volume. Le compresseur axial de 16 étages d'aubes orientables attachés à l'arbre HP de turbine ou son angle et sa forme sont conçus pour une circulation axiale d'air de débit plus élevée nécessaire pour obtenir une grande puissance avec des dimensions réduites.

Arbre HP et l'arbre LP :

Le compresseur et la charge de la turbine n'exigent pas la même vitesse ni la même énergie pour une meilleur performance et réduction de problème de pulsation (pompage) de compresseur axial d'une façon acceptable, delà vient l'exigence de diviser l'arbre de turbine à deux arbres tournantes à différentes vitesses, un arbre HP qui entraîne le compresseur et les accessoires et l'arbre LP qui entraîne la charge.



Figure III.10: Turbines HP & BP.

C. Section de combustion :

La section de combustion se compose de douze (12) chambres de combustion annulaire , chaque chambre reçoit le gaz et l'air comprimé du compresseur axial pour faire un mélange combustible qui allumer par une bougie et un injecteur en créant une grande énergie de chaleur dans le gaz, ce gaz chaud détend et s'écoule vers la turbine en forçant les roues de la turbine à tourner.

L'installation du système de combustion comporte six brûleurs, comprenant chacun un brûleur principal et un brûleur pilote et six chambres de combustion. Les brûleurs sont montés à la partie supérieure et les chambres de combustion sont à l'intérieur des carters de chambre de combustion positionnés de manière uniforme sur le carter central de la turbine. La partie supérieure de la chambre de combustion est assujettie sur le brûleur principal et la partie inférieure rainurée porte le segment de piston qui est situé dans la conduite de transition. Le brûleur assure une alimentation contrôlée en carburant sous une forme appropriée pour le bon fonctionnement du système de combustion.

La combustion est initiée par deux bougies et l'allumage dans ces deux chambres s'écoulent par les tubes traversables pour faire l'allumage dans les autres chambres. La veine du système l'admission de la turbine transforme les écoulements du gaz de chacune des chambres de combustion en un courant annulaire continu adapté à l'admission de l'anneau de la directrice du premier étage de la turbine. Trois quart d'air entré dans la chambre de combustion est utilisée au refroidissement, une quantité d'air s'écoule entre la chemise et le couvercle pour refroidir le couvercle et une autre quantité entre à l'intérieur de chemise à travers des trous pour refroidir le gaz chaud et l'éloigner des parois de chemise.

La section de combustion de la turbine à gaz se compose de :

- Douze chambres de combustion (couvercle et doublure).
- Douze injecteurs de combustible (pilote).
- Quatre détecteurs de flamme à ultraviolet.
- Deux bougies à électrodes rétractiles.
- Douze tubes transversaux d'interconnexions.

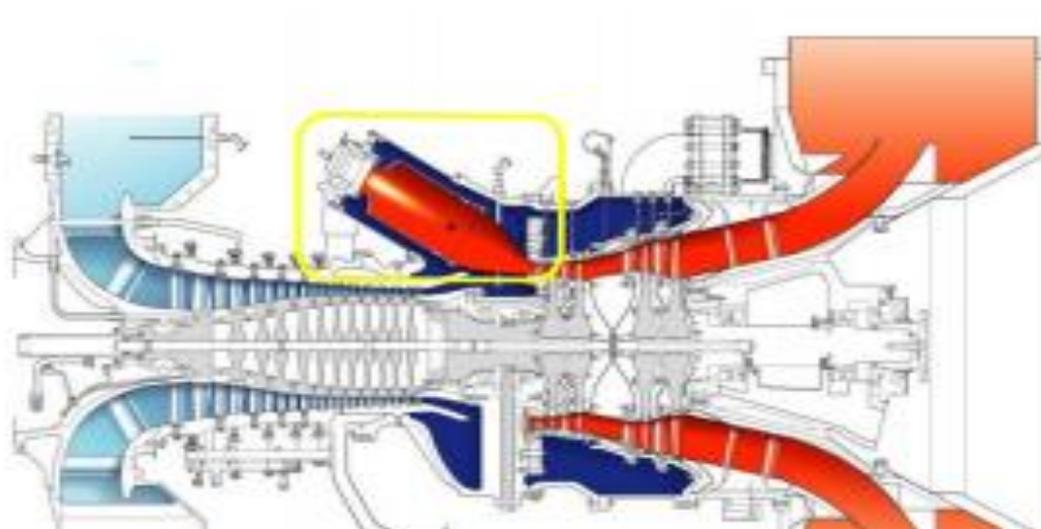


Figure III.11: Enveloppe externe de la chambre de combustion.

❖ **Brûleurs de combustible :**

Le combustible est injecté dans le moteur via les Brûleurs .Il peut s' agir de gaz ou de combustible liquide.

-Brûleurs DLE

Constitués de deux composants principaux : le brûleur pilote et le brûleur principal.

-Non DLE

Constitués uniquement d'un brûleur (MPI). Ces brûleurs s'après en tente selon différentes configurations et différents types. Ils fonctionnent sur gaz combustible classique, combustible liquide, bicom bustible, et peuvent également injecter de l'eau et de la vapeur, etc.



Figure III.12: type de système de combustion DLE

D. Section turbine (détente):

Les gaz chauds comprimés, entre dans la section de turbine dite aussi section de détente, pour céder une grande partie de leur énergie emmagasinée, ils trouvent dans leur trajectoire la première étage (première distributeur annulaire), son rôle est de diriger les gaz chauds sur les aubes de la première roue HP. Les gaz chauds est passé ver le deuxième distributeur annulaire, son rôle est de diriger les gaz chauds sur les aubes de la deuxième roue HP. La trajectoire des gaz dans les roues HP est tangentielle au profil des intrados des aubes afin d'éviter les chocs (perte d'énergie) et d'avoir un couple résultant maximal. Les deux roues de turbine HP, se compose d'un ensemble d'aubes indépendantes les unes par rapport aux autres, elles ont une forme aérodynamique étudiée avec soin pour permettre de récupérer le maximum de couple; elles sont creuses afin de réduire leurs masses et les forces centrifuges qui peuvent aller jusqu'à l'arrachement de ces dernières. Les deux étages turbinent du compresseur en porte à faux et sont refroidis par air.



Figure III.13: Caisse turbine du compresseur (HP)

Les roues HP est liée directement au rotor du compresseur axial, l'ensemble est souvent appelé rotor, la détente des gaz dans la roue HP fait tourner le compresseur axial (autonomie), ce rotor est supporté par deux paliers, palier de butée avant le compresseur et palier porteur avant la roue HP. Une deuxième détente a lieu dans les roues BP. Les gaz sortant des roues HP traversent un premier distributeur annulaire et le deuxième BP pour la conversion d'une partie de leurs énergies thermiques et de pression en une énergie cinétique servant à faire tourner les roues de turbine de puissance. Les deux arbres sont indépendants.

Du fait que les gaz ont perdus une partie de leur énergie après passage dans les roues HP, la deuxième roue de turbine est d'un diamètre plus grand, avec des aubes plus longues, pour maximiser la surface de contact (plus de couple). Les aubes sont soutenues des deux extrémités afin d'éviter leur Flexion. Les gaz quittant la roue BP sont envoyés à l'échappement et, le couple résultant sert à faire tourner la charge qui est généralement variable dans ce cas ; la variation du ce couple est assurée par la variation au débit de fuel gaz et la quantité de l'air à l'aide des deux clapets de décharge (BOV). La deuxième roue est aussi supportée par deux paliers, un palier porteur après la roue et le deuxième palier de butée avant la accouplement. Un palier de butée pour résister contre la poussée axiale et limiter la position axiale du rotor pour éviter le frottement avec les pièces du stator lors de fonctionnement est placé décoté du premier palier porteur, il est de type à patins.

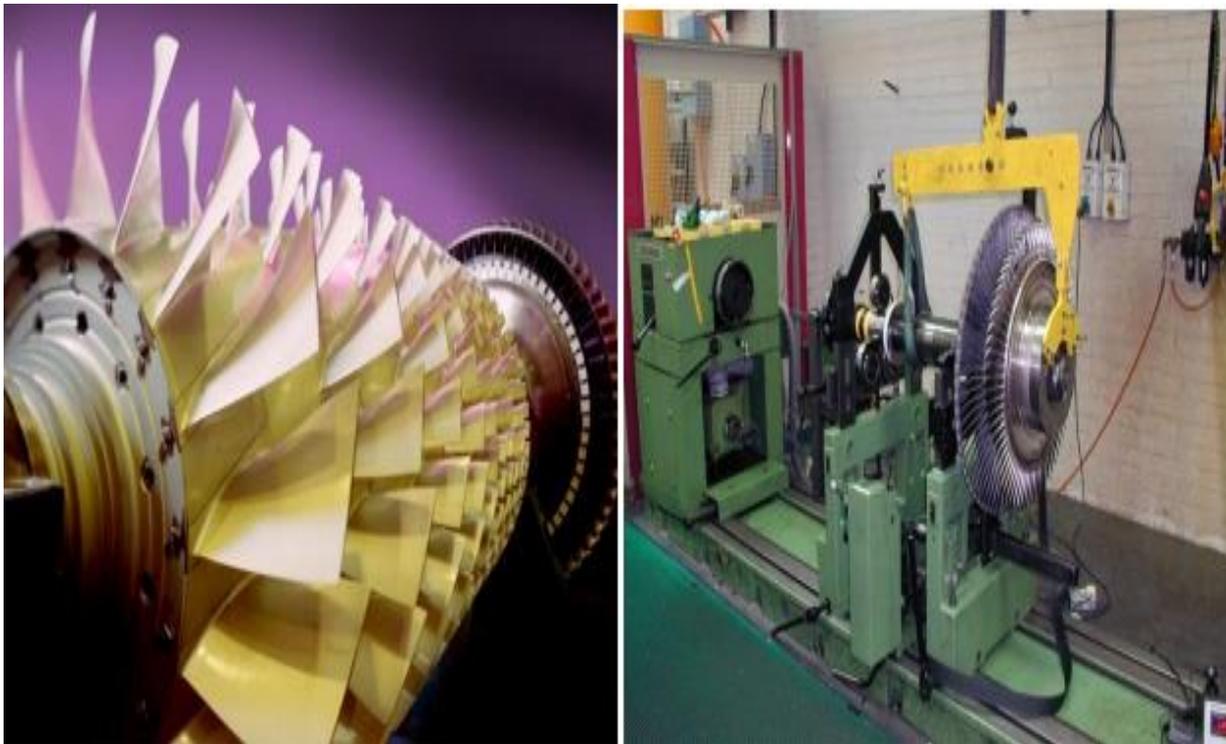


Figure III.14: Rotors HP, BP

E. Section échappement:

La section d'échappement se compose essentiellement du plenum ou cadre d'échappement ainsi que le caisson d'échappement.

Elle a pour fonction, l'expulsion vers l'atmosphère des gaz provenant de la détente dans les roues de la turbine.

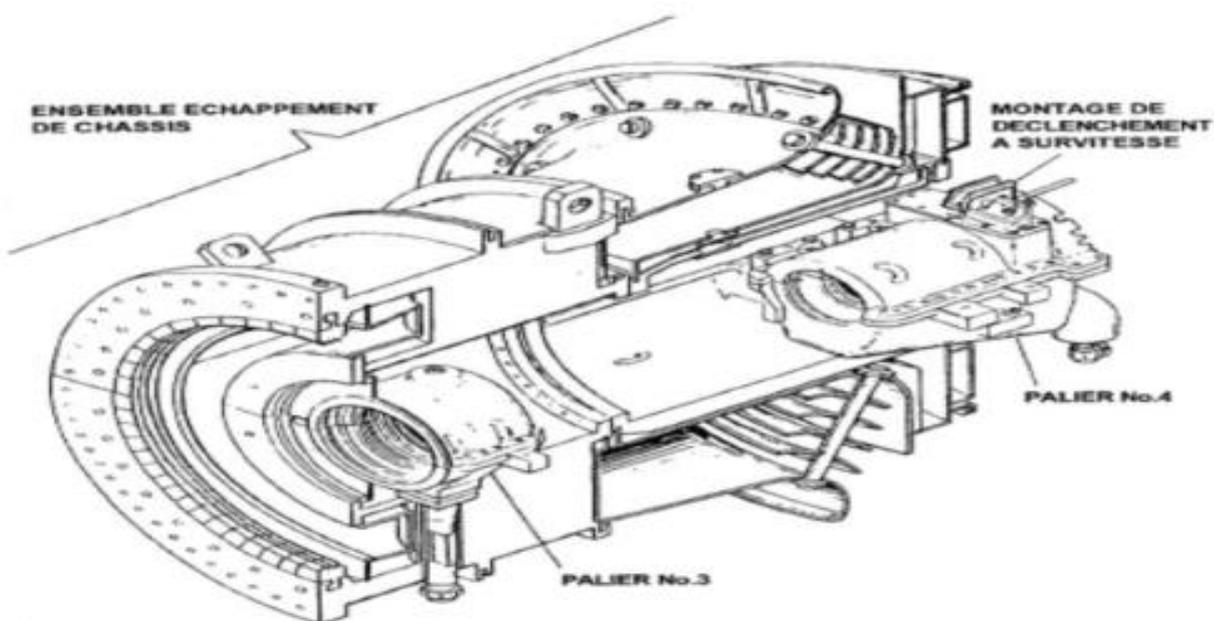


Figure III.15: Disposition caisse échappement et paliers

II.1.4.5. Système-de-démarrage :

Le démarrage de la turbine à gaz est assuré par un système de démarrage hydrostatique à entraînement par boîte de vitesse à multiplicateur de vitesse et ensemble embrayage de sur pilotage. Le rotor de la turbine

est accéléré à une vitesse à laquelle un combustible peut être introduit dans la combustion système et en flammé pour fournir l'auto accélération soutenue, à la normale vitesse de fonctionnement.

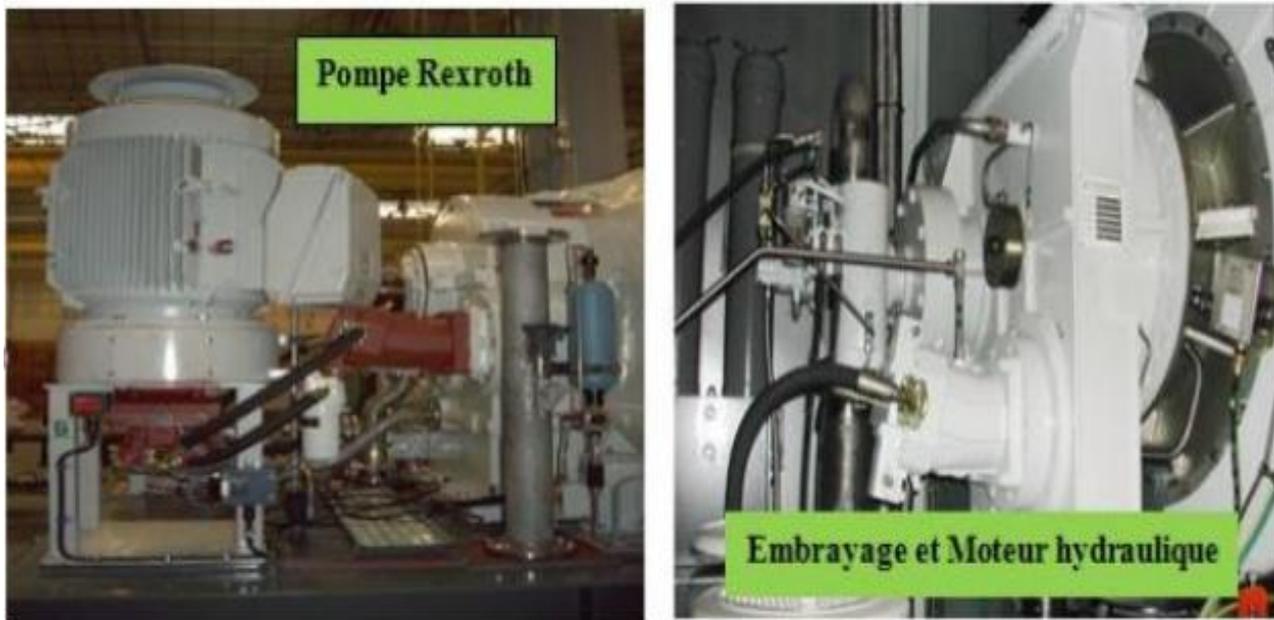


Figure III.16 : Système de démarrage hydrostatique

III.1.4.5. Système de lubrification et graissage d'huile :

Huile lubrifiante minérale est utilisée pour lubrifier et refroidir le tourillon de turbine et les paliers lisses et des butées, les roulements moteur et les unités auxiliaires roulements de boîte de vitesses d'engrenages et cannelures.

L'huile est aussi utilisée comme un liquide hydraulique pour faire fonctionner le départ hydraulique Système lors du démarrage de la turbine. L'huile est délivrée à partir d'un réservoir de sur-dérapiage d'huile lubrifiante et distribué à travers le système de lubrification dans des conditions normales de fonctionnement par une pompe à huile principale. Le système comprend trois pompes (auxiliaire, principale, et d'urgence) et une soupape de commande de température, de soupape de commande de pression, filtres, deux réchauffeurs et un refroidisseur. Le système de contrôle enclenche la pompe auxiliaire lorsque la pompe de boîte d'engrenage principale est incapable de fournir une pression d'huile de lubrification suffisante (pendant le lancement et le ralentissement de la turbine).

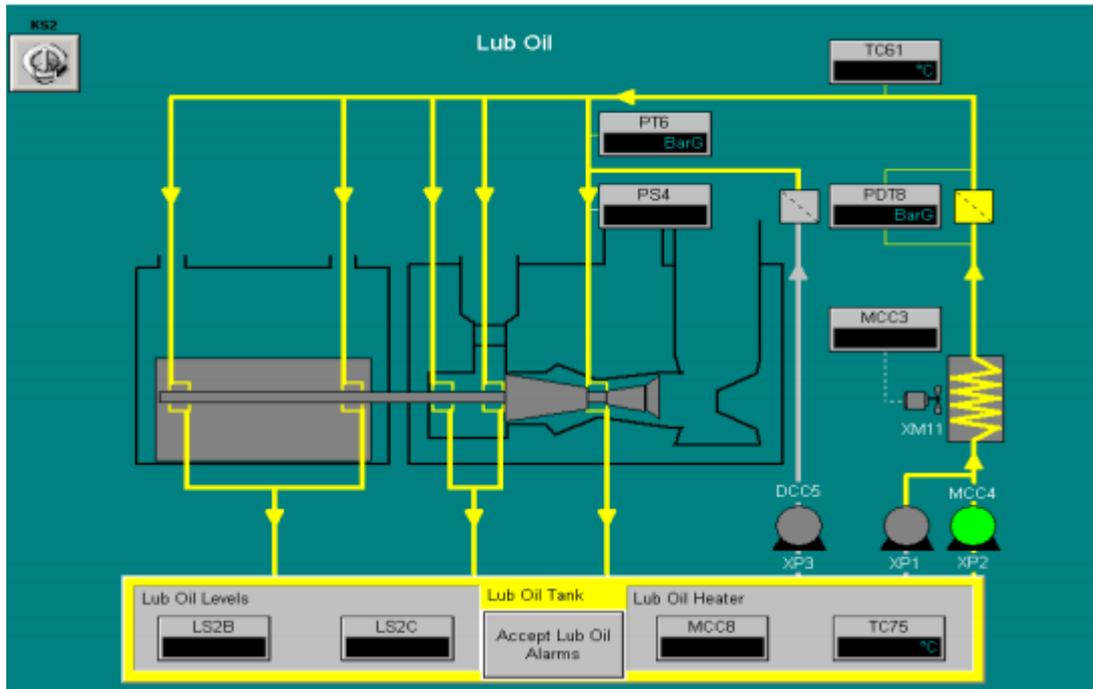


Figure III.17: Schéma de système de lubrification

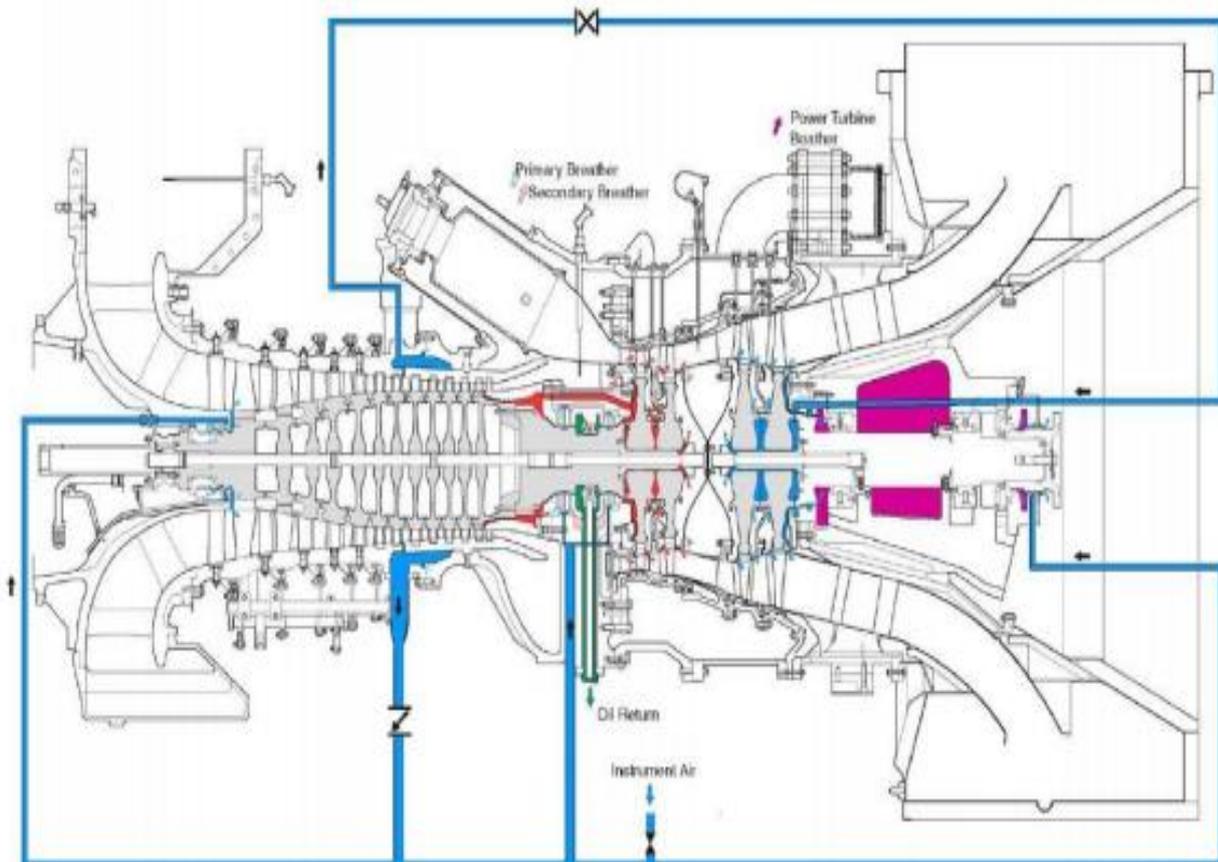
III.1.4.6. Système d'air de refroidissement et d'étanchéité:(Figure III.18) [8]

L'air du compresseur est utilisé pour l'étanchéité des joints à labyrinthe et le refroidissement des composants à haute température. L'air de pression moyenne, en provenance du dispositif de purge du septième étage du compresseur est utilisé pour :

- ✓ Pressuriser le joint à labyrinthe d'admission
- ✓ Pressuriser les joints à labyrinthe situés de part et d'autre du coussinet de la turbine de compresseur pour empêcher que l'air haute pression du dixième étage ne pénètre dans le logement de palier.
- ✓ Pressuriser les joints à labyrinthe de la TP et refroidir les disques de turbine.

L'air de purge haute pression de dixième étage en provenance de la section en amont de l'aube directrice de sortie du compresseur est utilisé pour :

- ✓ Refroidir les disques de rotor de turbine et le diaphragme intermédiaire.
- ✓ L'air haute pression est utilisé pour l'étanchéité du palier de sortie TC
- ✓ Utilisé pour refroidir les disques de rotor de TC, et les aubes de rotor de TC1 et TC2 par un système de convection à triple passage avant d'être refoulé dans le flux de gaz.



● L'air moyenne pression provient du 7^{ème} étage
 ● L'air moyenne pression provient du 10^{ème} étage

Figure III.18: Système d'air de refroidissement et d'étanchéité

III.1.5. Généralité sur la turbine à gaz

1-Turbines à gaz:

Dans sa forme la plus simple et la plus répandue, une turbine à gaz (aussi appelée turbine à combustion) est composée de trois éléments :

- un **compresseur**, centrifuge ou plus généralement axial, qui a pour rôle de comprimer de l'air ambiant à une pression comprise aujourd'hui entre 10 et 30 bars environ ;
- une **chambre de combustion**, dans laquelle un combustible gazeux ou liquide est injecté sous pression, puis brûlé avec l'air comprimé, avec un fort excès d'air afin de limiter la température des gaz d'échappement ;
- une **turbine**, généralement axiale, dans laquelle sont détendus les gaz qui sortent de la chambre de combustion.

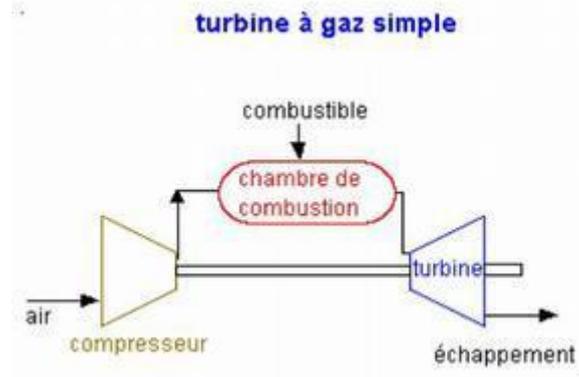


Figure III.19: turbin à gaz simple

Sous cette forme, la turbine à gaz constitue un **moteur à combustion interne à flux continu**. On notera que le terme de turbine à gaz provient de l'état du fluide de travail, qui reste toujours gazeux, **et non du combustible utilisé**, qui peut être aussi bien gazeux que liquide (les turbines à gaz utilisent généralement du gaz naturel ou des distillats légers). Il existe aussi des turbines à gaz à cycle fermé, utilisées pour des applications particulières. Bien évidemment, il s'agit alors de moteurs à combustion externe.

Pour atteindre des taux de compression r de 20 ou 30, le compresseur est multiétagé, avec parfois une réfrigération intermédiaire destinée à réduire le travail consommé. Les rotors axiaux sont constitués d'un empilage de disques, soit montés sur un moyeu central, soit assemblés en tambour sur leur périphérie. Les matériaux utilisés vont des alliages d'aluminium ou de titane pour les premiers étages aux alliages d'acier et aux alliages réfractaires pour les derniers étages, qui peuvent supporter des températures atteignant 500 °C.

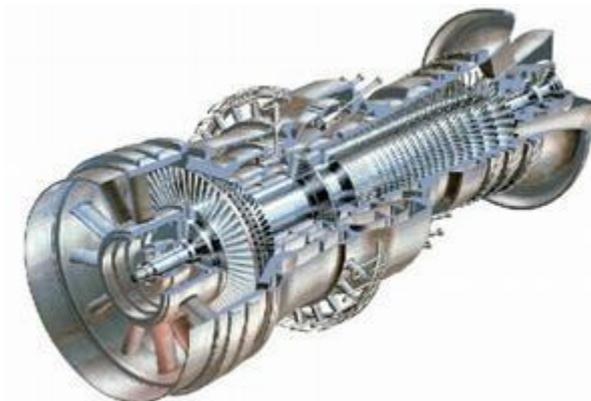


Figure III.20 : turbine

La **chambre de combustion** est normalement construite en alliage réfractaire.

Dans les turbines à gaz à cycle ouvert, les principales contraintes technologiques se situent au niveau des premiers étages de la **turbine de détente**, qui sont soumis au flux des gaz d'échappement à très haute température.

Les pièces les plus exposées sont en particulier les **aubages du rotor**, qui sont très difficiles à refroidir et, de plus, particulièrement sensibles à l'abrasion. Il importe donc d'utiliser un combustible très propre (absence de particules et de composants chimiques susceptibles de former des acides), et de limiter la température en fonction des caractéristiques mécaniques des aubages. Les matériaux utilisés pour les aubages de la turbine sont des alliages réfractaires à base de nickel ou de cobalt, et on envisage de recourir à des céramiques dans l'avenir.

Comme le rendement du cycle est lui-même une fonction croissante de la température, d'importants **développements technologiques** ont été consacrés à la mise au point, d'une part de systèmes de refroidissement efficaces des aubages, et d'autre part de matériaux résistant aux températures élevées. Depuis un demi-siècle, on a ainsi pu relever progressivement (d'environ 20 °C par an) le niveau de température d'entrée dans la turbine, pour atteindre aujourd'hui 1300 à 1500 °C.

2-Modélisation d'une turbine à gaz avec Thermoptim

a-Turbine à gaz simple

Il est possible de modéliser en première approximation un cycle de turbine à gaz de manière analytique, en faisant l'hypothèse que la machine était traversée par un débit constant d'air parfait.

De tels modèles trouvent toutefois assez rapidement leurs limites du fait qu'en réalité le débit-masse et la composition des gaz varient et que leur capacité thermique massique dépend de la température.

Si l'on veut s'affranchir de cette hypothèse, les calculs analytiques deviennent vite inextricables. Il est en revanche tout à fait possible de modéliser avec une bonne précision divers cycles de turbines à gaz avec Thermoptim comme nous le verrons ci-dessous. C'est en ce sens que la méthode proposée dans ce portail complète l'approche classique en permettant d'obtenir des résultats beaucoup plus précis et vraisemblables. Cette **exploration dirigée** vous familiarisera avec le modèle Thermoptim de ce cycle, la chambre de combustion étant remplacée par un simple échauffement.

Cette **exploration dirigée** vous familiarisera avec le modèle Thermoptim de ce cycle, avec paramétrage de la chambre de combustion.

Cette figure montre le résultat d'une telle modélisation.

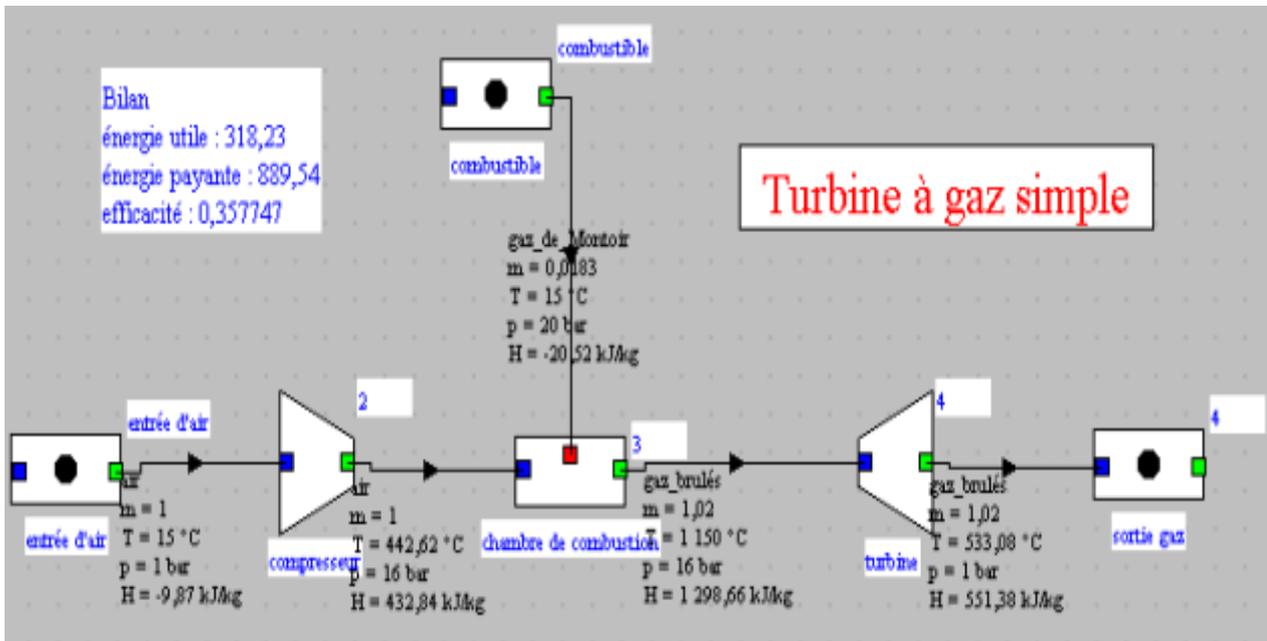


Figure III.21 : Synoptique de turbine à gaz dans ThermoOptim

b-Turbine à gaz à deux arbres

La turbine à gaz la plus simple est une machine où le compresseur et la turbine sont accouplés sur le même arbre, lequel entraîne directement la machine réceptrice.

On peut montrer que la turbine à une ligne d'arbre est mal adaptée pour un fonctionnement à charge partielle, surtout si la vitesse de rotation est imposée (cas de la production d'électricité par exemple). En revanche, en cas de décharge brusque de la machine réceptrice, la vitesse d'emballement de la turbine à gaz reste modérée, le compresseur absorbant près des deux tiers de la puissance fournie par la turbine.

Les limites d'adaptation de la turbine à un seul arbre conduisent à l'idée de la séparer en deux parties selon ses fonctions respectives : d'une part la turbine auxiliaire ou liée, généralement située à l'amont, dont le rôle est uniquement d'entraîner le compresseur, et d'autre part la turbine de puissance utile, entraînant la machine utilisatrice (figure ci-dessous). On distingue ainsi le générateur de gaz, à l'amont, et la turbine libre, à l'aval.

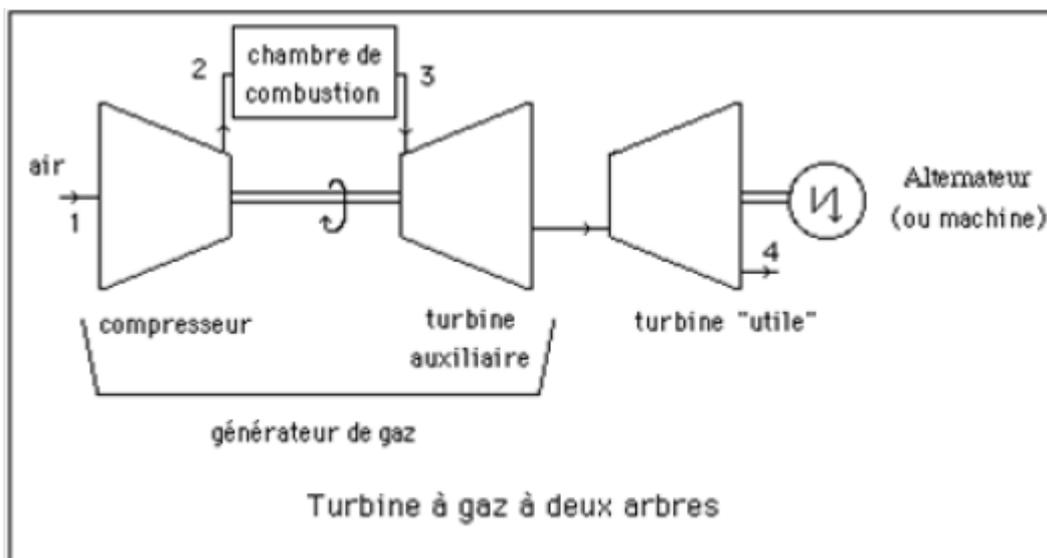


Figure III.22: Schéma d'une turbine à gaz à deux arbres

Le générateur de gaz étant mécaniquement indépendant de la machine utilisatrice, on peut faire varier sa vitesse de rotation sans contrainte.

Le fonctionnement à charge partielle s'obtient en jouant simultanément sur l'injection de combustible et sur la vitesse de rotation, ce qui a pour effet de réduire le débit aspiré par le générateur de gaz. La puissance fournie peut ainsi être réglée en conservant un rendement acceptable dans un intervalle beaucoup plus large qu'avec la turbine à un seul arbre (80 % du rendement nominal à 60 % de la charge, 60 % à 30 % de la charge). En revanche, le rendement nominal est un peu plus faible que celui de la turbine à gaz à un seul arbre, du fait de pertes par frottements accrues, et le coût d'installation est légèrement plus élevé.

Les installations à deux arbres sont donc surtout utilisées lorsque l'on recherche un bon rendement dans un large domaine de variation de puissance de la machine réceptrice. C'est notamment le cas des transports, et en particulier de la **propulsion aéronautique**.

Un avantage supplémentaire des turbines à gaz à deux arbres est qu'il est possible de faire tourner le générateur de gaz à très haute vitesse (entre 20 000 et 30 000 tours/mn), ce qui autorise des constructions très compactes. En particulier, les constructeurs de moteurs d'avion ont développé des techniques très performantes, utilisant des arbres creux pour réduire l'encombrement dû à la présence des deux arbres.

Enfin, les problèmes de démarrage sont grandement facilités puisqu'on peut lancer le générateur de gaz à sa vitesse nominale avant de coupler la turbine utile à la machine réceptrice. On dispose ainsi d'une réserve de puissance pour vaincre le couple de démarrage de cette dernière, ce qui n'est pas le cas dans les installations à un seul arbre.

Cette figure montre le synoptique Thermoptim d'une turbine à gaz à deux arbres.

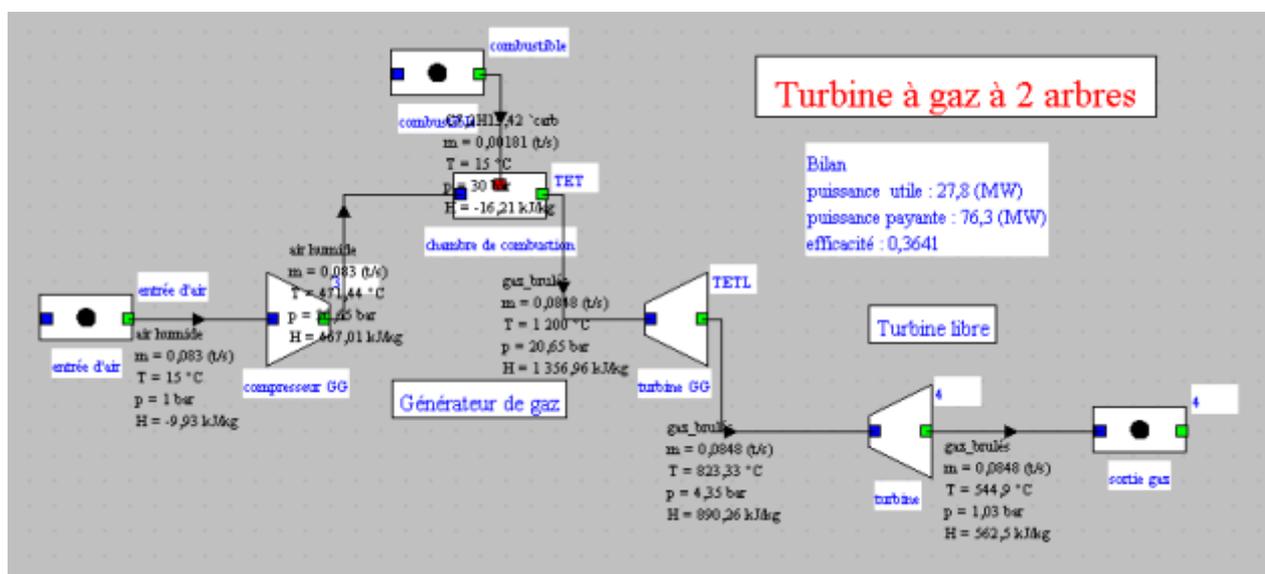


Figure III.23 : Variantes du cycle thermodynamique de base

Ce document explique comment réaliser une telle modélisation avec Thermoptim.

modélisationTAG_2_arbres.pdf

c-Variantes du cycle thermodynamique de base

Dans une turbine à gaz, le rejet dans l'atmosphère des gaz sortant de la turbine correspond à une très grande irréversibilité. Il est parfois possible de la réduire.

Une autre idée pour améliorer le cycle consiste à fractionner la compression ou la détente. Cette opération peut le cas échéant être répétée plusieurs fois.

Diverses variantes du cycle de base ont ainsi été proposées.

d-Turbine à gaz à régénération

Les gaz d'échappement sortent à des températures élevées (de l'ordre de 500°C), alors que la température de l'air sortant du compresseur est plus basse (typiquement autour de 400°C).

Il est donc envisageable de réchauffer partiellement cet air avant entrée dans la chambre de combustion, ce qui réduit d'autant la consommation de combustible. Il suffit pour cela d'insérer un échangeur de chaleur entre les gaz d'échappement et l'air comprimé.

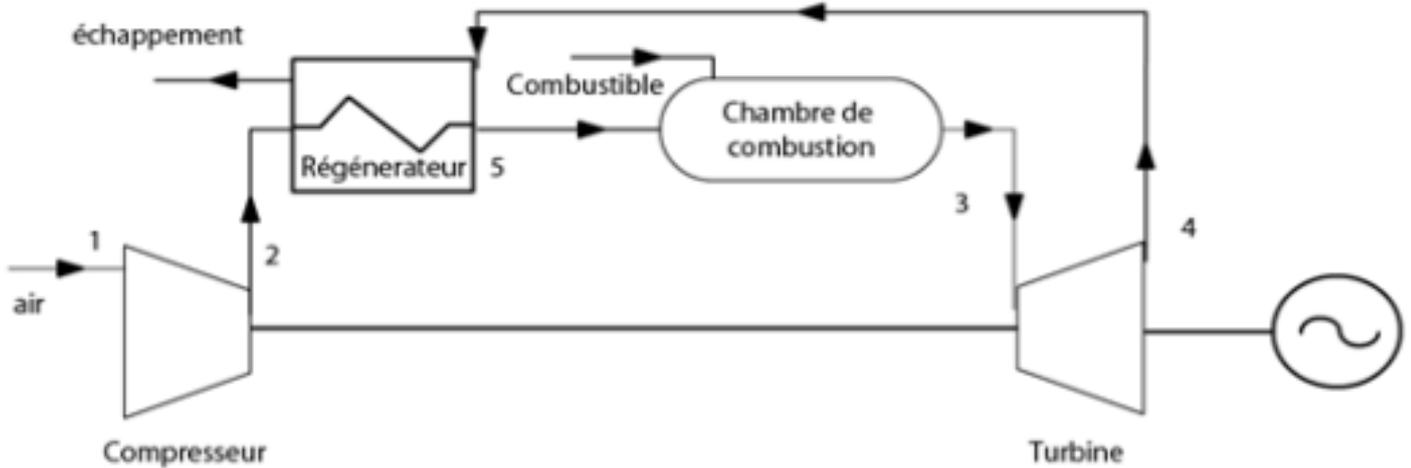


Figure III.24: Cycle de turbine à gaz à régénération

On appelle cycle à régénération cette variante du cycle simple.

Une **exploration dirigée** permet d'étudier ce cycle en détail (C-M2-V2).

e-Turbine à gaz à compression et détente fractionnées

Une autre idée pour améliorer le cycle consiste à fractionner la compression ou la détente. Cette opération peut le cas échéant être répétée plusieurs fois.

Examinons le cas d'un cycle dit à refroidissement intermédiaire, dans lequel la compression est fractionnée (figure ci-dessous). En sortie du premier corps de compression, l'air à 185°C est refroidi par échange avec l'air extérieur à 15°C , ce qui permet de baisser sa température à 20°C . Il est alors recomprimé à la pression finale, le travail de compression étant plus faible.

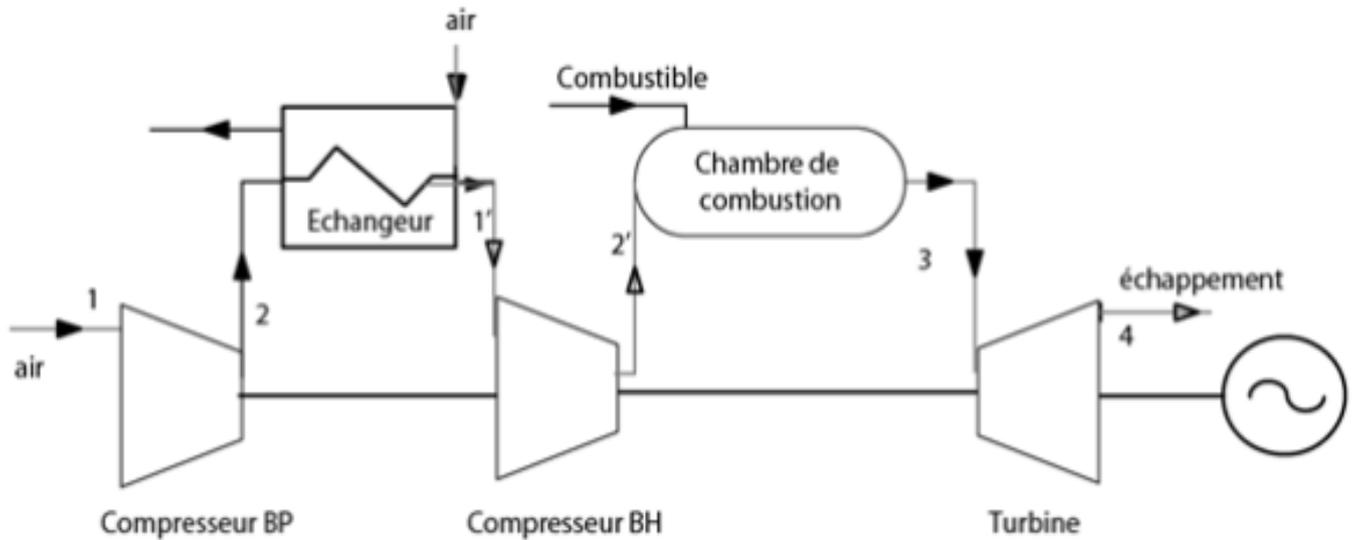


Figure III.25: Cycle de turbine à gaz à compression fractionnée

En revanche, comme la température de sortie du deuxième corps de compression a elle aussi baissé, il faut apporter plus de chaleur dans la chambre de combustion. Le bilan global reste cependant bénéfique.

Une **exploration dirigée** permet d'étudier ce cycle en détail (C-M2-V3).

La difficulté est que la morphologie des turbines à gaz qui conduisent aux meilleures performances n'est généralement pas bien adaptée à un refroidissement intermédiaire, de telle sorte que cette solution est rarement employée

Il est en revanche souvent plus facile d'insérer une combustion séquentielle qu'un refroidissement intermédiaire, la chambre de combustion pouvant être de taille beaucoup plus petite qu'un échangeur de refroidissement.

3-Analyse fonctionnelle

La fonction principale d'une turbine à gaz est de **produire de la puissance mécanique à partir d'un combustible liquide ou gazeux propre**

Les fonctions des éléments mis en évidence à partir de l'analyse technique précédente peuvent être énoncées comme suit :

- comprimer l'air entrant ;
- le porter à haute température par combustion ;
- détendre les gaz brûlés dans une turbine produisant du travail mécanique.

Le problème est d'autant plus difficile à résoudre que les formes des tuyères fixes et des aubages mobiles des turbines sont très complexes, surtout dans les modèles de petite taille dérivés de l'aviation.

Pour effectuer le refroidissement, on prélève de l'air à différents niveaux du compresseur, en fonction de la pression désirée, pour le réinjecter dans la turbine.

Cet air parcourt ensuite l'intérieur des aubages, à travers un jeu de chicanes judicieusement conçu, pour être ensuite évacué avec les gaz d'échappement, soit au niveau du bord de fuite, soit en ménageant une certaine porosité à travers la paroi.

Il faut donc introduire une fonction contrainte « Refroidir les aubages ».

Une fonction contrainte supplémentaire correspondant à l'alimentation en combustible doit aussi être ajoutée, et une autre pour représenter le contrôle de la combustion, toute surchauffe pouvant conduire à une détérioration de la turbine.

Enfin des précautions particulières doivent être prises pour bien lubrifier le moteur, une fonction contrainte elle aussi fondamentale pour sa bonne marche.

4-cycles de turbine à gaz

Cycle à refroidissement intermédiaire,

- Cycle à combustion séquentielle,
- Cycle à refroidissement intermédiaire, combustion séquentielle et régénération,
- Cycle à injection de vapeur

Nous vous proposons aussi quelques **exercices** pour développer votre capacité de modélisation de ces cycles avec ThermoOptim. Les énoncés étant très succincts, le schéma de l'installation est fourni dans chaque cas. Les corrigés sont accessibles aux enseignants authentifiés. Une fois le modèle établi, vous pouvez faire des études de sensibilité pour analyser l'influence des différents paramètres sur les performances des cycles.

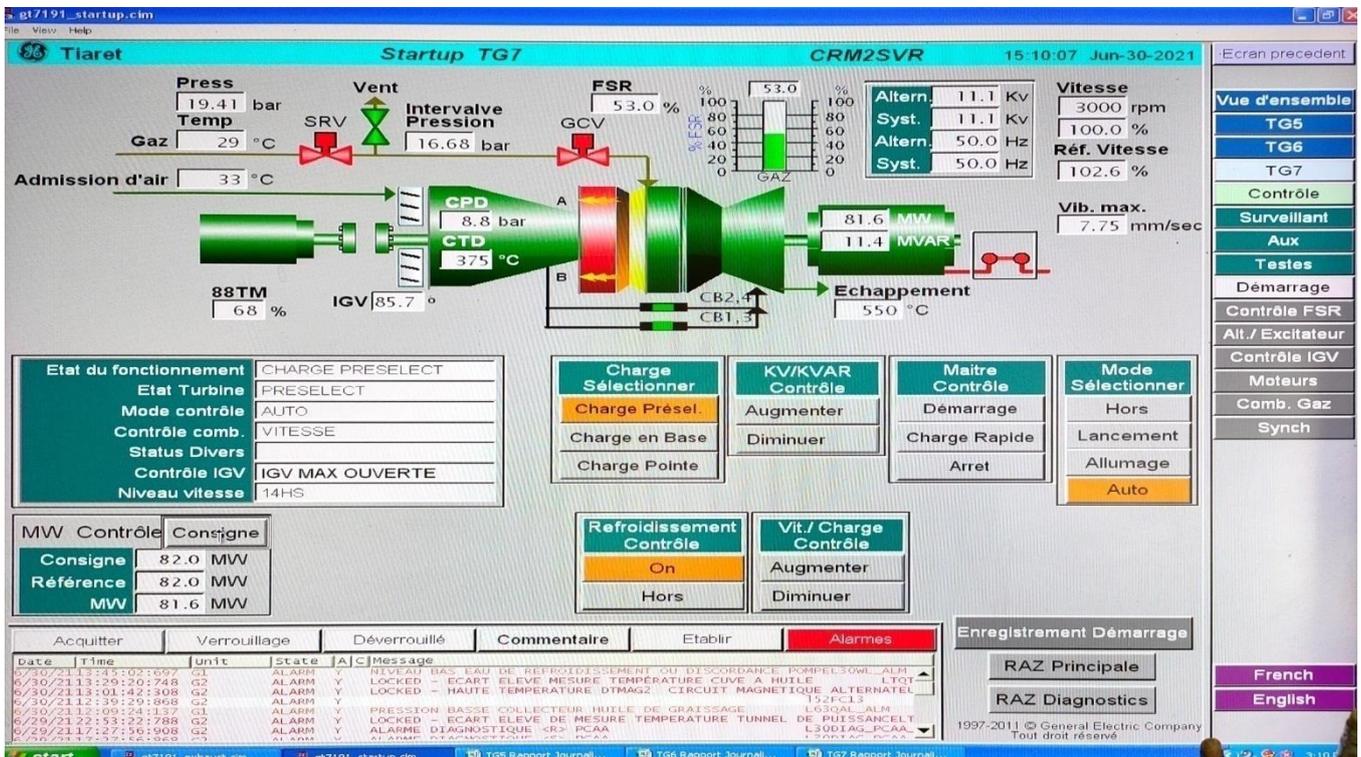


Figure III.26: cycles de turbine à gaz (Tiaret).

III.1.6. caractéristiques de l'équipement:

III.1.6.1. Caractéristiques de la turbine:

Tableau III.1 : la turbine(T 9E)

Client	Sonelgaz
Site	Tiaret
Nombre de groupes turbine à gaz-alternateur	3
Type	9001 E
Application de la turbine	Entrainement d'un alternateur
Cycle	Simple
Fonctionnement de la turbine	Cycle ouvert
Combustible	Simple Gaz
Base	Site – 5 C°
Type d'opération	Base, 4-600 h/an
Altitude	970 m
Compresseur	Etage : 17 Vitesse: 300 t/mn
Turbine	Etage : 3 Vitesse: 300 t/mn
Courbes de performances	Allure de base: 495 HA 697 495 HA 698
	Allure de pointe: 495 HA 699 495 HA 248
Puissance (bornes alternateur)	Base – Site : 97850 KW
Facteur de puissance	0,8 11,5 KW 300 t/mn 50 HZ

Tableau III.2: la turbine (M 9E)

Client	Sonelgaz
Site	Msila
Nombre de groupes turbine a gaz/alternateur	3
Type	9001 E
Application de la turbine	Entrainement d'un alternateur
Cycle	Simple
Fonctionnement de la turbine	Cycle ouvert
Combustible	Simple gaz
Base	Site – 15 C°
Type d'opération	Base, 400-600 h/an
Altitude	500m
Compresseur	Etage : 17 Vitesse: 300 t/mn
Turbine	Etage : 3
	Vitesse: 300 t/mn
Courbes de performance	Allure de base: 495 HA 697 495 HA 698
	Allure de pointe: 495 HA 699 495 HA 248
Puissance (bornes alternateur)	Base – Site 103 450 KW
Facteur de puissance	0,8 11,5KW 300t/mn 50HZ

III.1.6.2. Caractéristiques de l'équipement de la turbine à Gaz**Tableau III.3:**Section compresseur

Nombre d'étage du compresseur	17
Type de compresseur	Compresseur axial
Corps compresseur et turbine	A joint horizontal
Type daubes a l'entrée du compresseur	orientables et modulables

Tableau III.4:Section combustion

Type	A 10 chambres de combustion, flux inversé
Injecteurs	Un (1) par chambre de combustion
Bougies	Deux (2), a électrodes rétractables
Détecteurs de flamme	Deux (2), aux ultraviolets

Tableau III.5: Section turbine

Nombre d'étage turbine	Trois (3) (à un sel arbre)
Dire rectrices	A aubes fixes

Tableau III.6: Paliers

Nombre	Trois (3)
Lubrification	A l'huile sous pression
Palier n°1(situé dans le corps d'admission du compresseur)	A trois ensemble: palier elliptique, butée Contrebutée
Palier n°2(situé dans le corps d'échappement du compresseur)	Elliptique
Palier n°3(situé dans le carder d'échappement turbine)	A patins oscillants

Tableau III.7: Disposition de démarrage

Moteur de lancement	Moteur électrique asynchrone (100KW) à 1485tr/mn
Convertisseur de couple	Hydrodynamique à commande par servomoteur électrique des aubages réglables du convertisseur

disposition de démarrage.

Tableau III.8: Système de combustible

Combustible utilisé	Gaz
Système de régulation du combustible	Régulation speedtronic MK 11
Vanne d'arrêt et de détente du combustible	A commande électro-hydraulique
Filtre(s) circuit combustible	un (1) filtre à tamis

Tableau III.9:Système de lubrification

Capacité du réservoir d'huile	Le système est composé : -une (1) bache en charge (6000 l) -un (1) réservoir de reprise -cuve à huile turbine 1500 l (approx.)
Pompe à huile principale	Pompe à engrenages attelée au réducteur des auxiliaires
Pompe à huile auxiliaire	Pompe verticale centrifugeur, entraînée par un moteur à courant alternatif
Pompe à huile de secours	Pompe verticale centrifugeur, entraînée par un moteur à courant continu
Réfrigérant(s) d'huile	Deux (2) échangeurs de chaleur huile eau de réfrigération à faisceau de tubes en U (manœuvrés par une vanne de transfert)
Filtre(s)	Deux (2) filtres à 5 microns (manœuvrés par une vanne de transfert)

Tableau III.10:Alimentation huile H.P

Pompe principale	Entrainée par le réducteur des auxiliaires. Pompe à cylindrée variable
Pompe auxiliaire	Entrainée par un moteur à courant alternatif. Pompe volumétrique à palette

Tableau III.11:Système d'eau de refroidissement

Pompe de circulation	Deux (2) moto-pompes dont l'une en secours. Entrainement par moteurs à courant alternatif
Aéroréfrigérants	Deux (2) rangées, six (6) moteurs par rangée, entraînant chacun un ventilateur de type axial-hélicoïde
Régulation et protection	Systèmes électronique SPEEDTRNIC MARK II avec I.T.S.

Conclusion :

La turbine à gaz est une machine motrice très compliquée du point de vue technique, comme exposé précédemment dans ce chapitre elle comporte différentes sections mécaniques indispensables dans le processus de conversion d'énergie. Chaque ensemble mécanique doit satisfaire des exigences de précision de fiabilité et de sécurité pour accomplir à bien sa fonction requise. Pour cela plusieurs disciplines sont mises en jeu pour la conception et le bon fonctionnement de cette machine, tel que la thermo dynamique et la structure des matériaux.

Nous avons informé que le CPF a les meilleurs procédés de traitement de gaz selon les différents procédés de traitement où : le refroidissement et séparation primaire, la déshydratation jusqu'à l'étape de fractionnement pour assurer la meilleure qualité de GPL, condensat et de gaz sec.

Enfin la puissance contrôlable de la turbine, son rendement élevé et sa fiabilité ont fait de cette machine un équipement indispensable dans l'industrie pétrolière.

La sécurité de la turbine est assurée par un certain nombre de dispositifs dont certains sont réservés pour des conditions de marche anormale ou des cas d'urgences demandant l'arrêt immédiat de la turbine pour empêcher tout dommage important aux équipements et composants de la turbine.

Conclusion

Conclusion Générale

La turbine à gaz est une machine motrice très compliquée du point de vue technique, comme exposé précédemment dans ce chapitre elle comporte différentes sections mécaniques indispensables dans le processus de conversion d'énergie. Chaque ensemble mécanique doit satisfaire des exigences de précision de fiabilité et de sécurité pour accomplir à bien sa fonction requise. Pour cela plusieurs disciplines sont mises en jeux pour la conception et le bon fonctionnement de cette machine, tel que la thermodynamique et la structure des matériaux.

Enfin la puissance contrôlable de la turbine, son rendement élevé et sa fiabilité ont fait de cette machine un équipement indispensable dans l'industrie pétrolière.

Références bibliographiques

Chapitre 1

Notes et références

- [1] David Augeix, Analyse vibratoire des machines tournantes, coll. « Techniques de l'ingénieur », 2001.
- [2] Un modèle analogique simplifié d'usage courant est « l'arbre De Laval » (appelé également « arbre Jeffcott » aux États-Unis).
- [3] Thomas Gmür, Dynamique des structures : analyse modale numérique, Lausanne/Paris, Presses polytechniques universitaires romandes, 1997, 570 p. ([ISBN 2-88074-333-8](#), [lire en ligne \[archive\]](#)), p. 303.
- [4] Nils Myklestad, « A New Method of Calculating Natural Modes of Uncoupled Bending Vibration of Airplane Wings and Other Types of Beams », Journal of the Aeronautical Sciences (Institute of the Aeronautical Sciences), vol. 11, avril 1944, p. 153–162 ([DOI 10.2514/8.11116](#)).
- [5] M. A. Prohl, « A General Method for Calculating Critical Speeds of Flexible Rotors », Trans ASME, vol. 66, 1945, A-142.
- [6] Cité par K. Gupta en introduction aux Actes du symposium de l'IUTAM consacré aux Emerging Trends in Rotor Dynamics (éd. Springer, New Delhi, 2009) : the quality of predictions from a computer code has more to do with the soundness of the basic model and the physical insight of the analyst. [...] Superior algorithms or computer codes will not cure bad models or a lack of engineering judgment.

Sources

- Yves Rocard, Dynamique générale des vibrations, éd. Masson et Cie (1960), 442 p.
- Maurice Roseau, Vibrations des Systèmes Mécaniques : Méthodes analytiques et applications, Paris/New York/Barcelone, Masson, 1984, 486 p., 1vol. relié (ISBN 2-225-80205-X)
- Fr. Nelson, « A Review of the Origins and Current Status of Rotor Dynamics », Proc. of the International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science (IFTToMM), Sydney, 2002.
- Mlaouhi Ibrahim, Théorie des machines tournantes Modélisation & Analyse, 2021 (ISBN 978-3-8416-3250-0 et 3-8416-3250-5, OCLC 1240326985, lire en

Chapitre III

- [1] Earl, Logan (Turbo machinery, basic theory and application), Marcel Dekker, Inc, 1953
- [2] RI, Lewis (Turbo machinery, performance, analyses), British library, 1996
- [3] Documentation SONATRACH DP Gassi Touil
- [4] Manuel SIEMENS SGT 400 Gas Turbine
- [5] Mémoire master : Morsli H /Ben Seddik Dj/ Brahimi S (Etude de Turbine à gaz MS5002b) 2013
- [6] Mémoire fin formation SH : Dartagnan Abdk (Etude thermodynamique de Turbine à gaz MS5002C) 2014
- [7] SONATRACH MARK V Operation * ENG (622457).Général électrique 2014.
- [8] Mémoire Ingénieur : Bouchaala Reguieg Mohamed/ Ben messaoud Mostefa (Etude de système de lubrification et calcul des paramètre de fonctionnement des palies de la turbine MS3002) 2007
- [9]- la turbine à vapeur en exploitation, E.A.KRAFT.
- [10]- Les machines transformatrices d'énergie, G.LEMASSON LIBRAIRAIE DELGRAVE.
- [11]- BENNARA.I," Etude et calcul de verification d'un turbo-alternateur ",
diplôme d'ingénieur d'état, UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGUARA
BOUMERDES, Promotion 2009.