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

UNIVERSITE –YAHIA FARES- MEDEA

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

2ème Années Master Génie Mécanique

Option Energétique

THEME :

Maintenance de la turbine à gaz MS 5002C

Présenté par :

- GUEBOUR Amine
- TOUATI Mouhamed Amine

Encadré par :

Dr. ZIRARI Monir
Dr. MAHDI Youcef

2017- 2018

Remerciements

Louange à Dieu le tout puissant, de m'avoir aidé à réaliser ce modeste rapport.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toute l'équipe de l'atelier Maintenance et particulièrement l'équipe de service mécanique, des ingénieurs, des techniciens ainsi que mes collègues qui m'ont tenu le rôle des guides durant cette insertion professionnelle, ils ont su me rassurer et me donner les moyens de concrétiser des projets en autonomie.

Je tiens aussi à remercier profondément mon parrain Pour son soutien,son aide, ses conseils et sa patience, qui m'ont été très précieux.

SOMMAIRE

Introduction générale *1*

CHAPITRE I : Présentation générale de l'établissement

1. Présentation du champ : *2*

2. Répartition du centre de production et bases de vie : *2*

3. Les systèmes d'exploitation au niveau du champ : *3*

3.1. Système de production d'huile : **3**

3.2. Traitement de pétrole brut : **3**

3.3. Expédition du brut : **4**

3.4. Système gaz lift : **4**

3.5. Système d'injection de gaz : **4**

3.6. Système d'injection d'eau : **4**

4. L'organigramme général de l'établissement : *5*

5. Présentation du service mécanique du champ Ourhoud: *5*

6. Les types de la maintenance effectués par le service mécanique : *6*

CHAPITRE II: Généralités sur les turbines

1. Description sommaire : *8*

2. Différents types des turbines: *8*

2.1. Turbine à vapeur (rendement 0,70 à 0,80) : **8**

2.2. Turbines à gaz ou turbines à combustion (TAC) : **8**

2.3. Turbines à vapeur : **8**

2.4. Turbines à gaz : **10**

3. Critéres de choix entre turbine a gaz et turbine a vapeur : *12*

CHAPITRE III: La turbine à gaz à deux arbres " MS 5002C"

1. Localisation de la turbine dans le procès du site : *14*

1.1. Description de l'unité 25 "Compression - Récupération du gaz en tête de puits ": **14**

1.2. Principe de fonctionnement du système : **15**

2. Caractéristiques techniques et de fonctionnement pour la turbine à gaz MS5002 C : *16*

2.1. Caractéristiques techniques de la turbine MS 5002C : **16**

2.2. Caractéristiques principales de fonctionnement de la turbine : **16**

3. Les éléments principaux de la turbine : *17*

3.1. Le compresseur d'air : **18**

3.2. La chambre de combustion : **18**

3.3 La caisse de la turbine: **18**

4. Principe de fonctionnement de la turbine : *19*

4.1. Admission de l'air ambiant : **19**

4.2. La compression de l'air admis : **19**

4.3. La combustion du mélange air/carburant : **21**

4.4. La transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique (turbinage): **24**

4.5. Echappement des gaz brulés hors de la turbine : **27**

5. Aperçue sur le fonctionnement théorique de la turbine à Gaz MS5002 C: *27*

6. Les axillaires de la turbine MS5002 C: *30*

7. Séquences de démarrage et d'arrêt de la turbine MS5002C : *48*

7.1. Séquences typiques de démarrage de la turbine : **48**

7.2. Séquences typiques d'arrêt de la turbine : **49**

CHAPITRE IV: La maintenance de la turbine " MS 5002 C"

1. Les types de maintenance appliqués pour la TAG MS5002 C: *50*

1.1. La maintenance conditionnelle (au cours de fonctionnement de la turbine): **50**

1.2. La maintenance systématique (les inspections à l'arrêt de la turbine): **52**

2. Quelques inspections effectuées au niveau du champ Ourhoud pour la turbine MS5002 C : *54*

2.1. Inspection de la chambre de combustion (COMBUSTION INSPECTION CI) : **54**

2.2. L'inspection de la veine des gaz chauds (HPGI) par NDT: **58**

2.3. L'inspection Majeur (Major Inspection MI) de la turbineMS5002 C : **60**

CHAPITRE V: Etude du cycle thermodynamique de la turbine MS 5002c

1. Introduction 65

2. Cycles thermodynamique de la turbine à gaz : 65

2.1. Cycle de Brayton : 65

2.2. Cycle réel de la turbine à gaz : 66

3. Calcul thermodynamique : 73

4. Influence des facteurs extérieurs sur les performances de la turbine à gaz : 81

4.1. L'influence de la pression atmosphérique : 82

4.2. L'influence de l'humidité relative 83

5. Influence des facteurs intérieurs sur les performances de la turbine à gaz : 83

5.1. Chutes de pression dans la section d'admission du compresseur : 84

5.2. Chutes de pression dans le système d'échappement de la turbine : 84

5.3. L'influence du type de combustible : 85

5.4. Extraction d'air à partir du compresseur axial : 86

6. Conclusion 87

Conclusion générale 88

Liste des figures

Figure I.1. Emplacement géographique....2
Figure I.2. Répartition du centre de production 3
Figure I.3. Les différents systèmes de traitement dans le CPF. 4
Figure I.4. Organigramme général de l'entreprise 5
Figure I.5. Organigramme du service mécanique. 5
Figure I.6. Les types de maintenance effectuées dans le service mécanique. 7
Figure II.1. Vue éclaté d'une turbine à vapeur. 8
Figure II.2.Schéma d'un turbin contrepression. 9
Figure II.3.Schéma d'une turbine à condensation. 9
Figure II.4.Schéma d'une turbine à extraction. 9
Figure II.5.Schéma d'une turbine à mixte. 10
Figure II.6.Schéma d'une turbine à un seul arbre. 11
Figure II.7.Schéma d'une turbine à deux arbres....12
Figure II.8.Schéma d'une turbine de type aviation. 12
Figure III.1. Schéma de l'unité 25. 14
Figure III.2. Les éléments principaux de la turbine. 17
Figure III.3. Compresseur axial....18
Figure III.4. Chambres de combustion....18
Figure III.5. La caisse de la turbine. 19
Figure III.6. Batteries des filtres d'aspiration 19
Figure III.7.Composants de compresseur axial....20
Figure III.8. Les IGV de compresseur 20
Figure III.9. Les chambres de combustion 21
Figure III.10. Les composants du système de combustion 22
Figure III.11.Les différents zones de la CC. 23
Figure III.12. Les pièces de transition. 24
Figure III.13.la directrice à aubes fixes. 25
Figure III.14.les éléments de turbinage. 26
Figure III.15.fixation des pales de compresseur. 27

Figure III.16. Schéma de fonctionnement théorique.....28
Figure III.17.variation des différents paramètres de fonctionnement.....28
Figure III.18.cycle de Brayton. 29
Figure III.19. Diagrammes de fonctionnement. 30
Figure III.20. Le système d'aspiration.....31
Figure III.21. Les filtres à cartouche. 32
Figure III.22.la vanne solénoïde.....32
Figure III.23. Système de lavage du compresseur. 33
Figure III.24. Le système d'échappement.....34
Figure III.25.Les moteurs de pompes auxiliaires de lubrification. 35
Figure III.26.Moteur de l'huile hydraulique. 36
Figure III.27.Schéma de l'huile de commande 36
Figure III.28.Schéma de l'huile hydraulique.....37
Figure III.29.le moteur de lancement 37
Figure III.30. Embrayage et le convertisseur de couple.....38
Figure III.31.le moteur vireur.....39
Figure III.32.schéma de commande du système de combustible. 40
Figure III.33.refroidissement des chambres de combustion. 41
Figure III.34.refroidissement des ailettes. 42
Figure III.35. Schéma de l'air d'étanchéité des paliers.....42
Figure III.36. Schéma explicative du gear box des auxiliaires.....43
Figure III.37.schéma de système de ventilation.....45
Figure III.38. Les aeros réfrigérants de l'huile de lubrification. 45
Figure III.39. Ecrans de contrôle des paramètres de fonctionnement.....48
Figure IV.1. Les aeros réfrigérants de l'huile.....52
Figure IV.2. Les organes du système de combustion.....55
Figure IV.3. Contrôle des longuettes. 56
Figure IV.4. Contrôle des injecteurs de fuel gaz. 56
Figure IV.5. Inspection des tubes d'interconnexion.....57
Figure IV.6. Inspection des tubes a flamme.....57
Figure IV.7. Inspection des IGV. 60

Figure IV.8. Démontage des caches et des circuits. 61
Figure IV.9. Les différentes caisses de la turbine. 62
Figure IV.10. Inspection NDT de la directrice. 63
Figure IV.11. Contrôle des cotes des paliers lisses. 63
Figure IV.12. Contrôle des soies des paliers. 63
Figure V.1 Cycle idéal d'une turbine à gaz dans le diagramme (P-V) et (T-S) 65
Figure V.2 Représentation schématique des composantes d'une turbine à gaz bi-arbre 66
Figure V.3 Cycle réel d'une turbine à gaz bi-arbre dans le diagramme(T-S) 67
Figure V.4 Bilan énergétique de la chambre de combustion. 75
Figure V.5 Influence de la température ambiante sur les performances de la turbine 82
Figure V.6. Influence de la pression sur les performances de la turbine 82
Figure V.7. Influence de l'humidité relative sur les performances de la turbine 83
Figure V.8 Influence de type du combustible sur les performances de la turbine 86

Liste des tableaux

Tableau III.1. Les caractéristiques techniques de la turbine 16

Tableau IV.1. Les paramètres contrôlés et les modes de contrôle. 50

Tableau IV.2. Les inspections de la CI. 53

Tableau IV.3. Les inspections de la HPGI. 53

Tableau IV.4. Les inspections de la MI.....54

Tableau. V.1 valeurs affichées sur l'écran de MARK VI.....73

Tableau .V.2 la composition du gaz naturel.....75

Tableau .V.3 comparatif des performances de la turbine à gaz sous différentes conditions opératoires et températures ambiantes.....79

Tableau .V.4 Effets des chutes de pression 84

ملخص

يتضمن هذا العمل المتواضع وصفا لنموذج التوربينات المستخدمة على نطاق واسع في حقل النفط الذي هو التوربين الغازي MS5002C والذي يحتوي على اثنين من الأعمدة المستقلة ميكانيكيا ، يستخدم لضغط الغاز من أجل إعادة إدخاله في موقع OURHOUD ، وهو يتضمن في المقام الأول لمحة عامة عن تأسيس OURHOUD وهياكله ، ثم يصف تشغيل التوربين ومساعديه ، وأخيرا ، فإنه يبدي أنواع مختلفة من الصيانة التي يتم تنفيذها لهذا الغرض من المعدات الاستراتيجية على المستوى الميدان.

هذا العمل يجعل من الممكن تقدير الحاجة لاستخدام توربينات الغاز MS5002C في مجال إنتاج النفط، هذه الآلات لديها تطور ملحوظ مبررة بشكل واضح من خلال موثوقيتها وبساطة تشغيلها

Résumé

Ce modeste travail comporte une description d'un modèle des turbines très utilisé dans le domaine pétrolier qui est la turbine à gaz MS5002C, qui possèdent deux arbres indépendants mécaniquement, et qui s'utilise pour la compression du gaz afin de le réinjecter au niveau du site OURHOUD. Il comporte, en premier lieu, une aperçue sur l'établissement d'Ourhoud et ses structures, ensuite, il décrit le fonctionnement de la turbine ainsi que ses auxiliaires, et enfin, il entame les différents types de maintenance qui s'effectuent pour cet équipement stratégique au niveau du champ.

Ce travail permet d'apprécier la nécessité d'utilisation des turbines à gaz MS5002C dans le domaine de production du pétrole. Ces machines connaissent un développement remarquable justifié à juste titre par leur fiabilité et simplicité d'exploitation.

Abstract

This modest work includes a description of a model of turbines widely used in the oil field which is the gas turbine MS5002C, which have two mechanically independent shafts, and which is used for the compression of the gas in order to reinject it into the OURHOUD website. It includes, in the first place, an overview of the establishment of Ourhoud and its structures, then it describes the operation of the turbine and its auxiliaries, and finally, it begins the different types of maintenance that are carried out for this. strategic equipment at the field level.

This work makes it possible to appreciate the necessity of using gas turbines MS5002C in the field of oil production. These machines have a remarkable development justifiably justified by their reliability and simplicity of operation.

Les mots clés:

MS5002C: turbine a gaz a deux arbres.

ORD : OURHOUD.

CPF: centre procèce facility.

TAG: turbine à gaz.

TAV: turbine à vapeur.

IGV: inlet gaz valve.

GCV: gaz controls valve.

Introduction:

Le pétrole est la matière première de la civilisation moderne, c'est la première source d'énergie mondiale grâce à ces propriétés physiques et chimiques principalement la quantité d'énergie par rapport au volume ainsi que le rendement et la rentabilité économiques qu'il offre ,la facilité de sa commercialisation ,sa production et son transport, l'abondance des réserves naturelles et les dérivés qu'on peut extraire, il remplace le charbon utilisé depuis très longtemps qui était moins pratique.

De nos jours, tous ce qu'on voie comme matériel mécanique, fonctionne avec de l'énergie fossile libérée par la réaction de combustion du carburant qui est extraie du pétrole ,c'est-à-dire que tout dépend de ce fluide noir, l'exemple le plus général est les moteursà combustion interne ou externe qui fait marcher des différents installations et systèmes, et parmi ces installations on cite les turbines à gaz qui font partie des équipements stratégiques dans le domaine industriel et particulièrement le domaine de pétrochimie.

Les turbines à gaz sont des groupes de force dont l'utilisation dans l'industrie deshydrocarbures est très répandue, compte tenu des puissances unitaires développées élevées, à defaciles adaptations, à des régimes variables des processus d'exploitation et à des modes dedémontage en blocs qui permettent des périodes de fonctionnement entre réparations de plus enplus élargies, ce qui font d'elles un des moyens les plus sollicités pour l'entraînement des charges mécaniques(surtout les compresseurs centrifuges de gaz).

Ce modeste travail comporte une description d'un modèle des turbines très utilisé dans le domaine pétrolier qui est la turbine à gaz MS5002C, qui possèdent deux arbres indépendants mécaniquement, et qui s'utilise pour la compression du gaz afin de le réinjecter au niveau du site OURHOUD. Il comporte, en premier lieu, une aperçue sur l'établissement d'OURHOUD et ses structures, ensuite, il décrit le fonctionnement de la turbine ainsi que ses auxiliaires, et enfin, il entame les différents types de maintenance qui s'effectuent pour cet équipement stratégique au niveau du champ.

1. Présentation du champ :

Le site Sonatrach Organisation Ourhoud, composé du champ pétrolier, du site de stabilisation du pétrole avant expédition et des installations annexes, est situé dans le bassin de BERKINE à 320 km au Sud-est de Hassi Messaoud et 1 200 km au Sud-est d'Alger, à une centaine au voisinage de la frontière Tunisienne et à environ 150 km de la frontière Libyenne.**[1]**

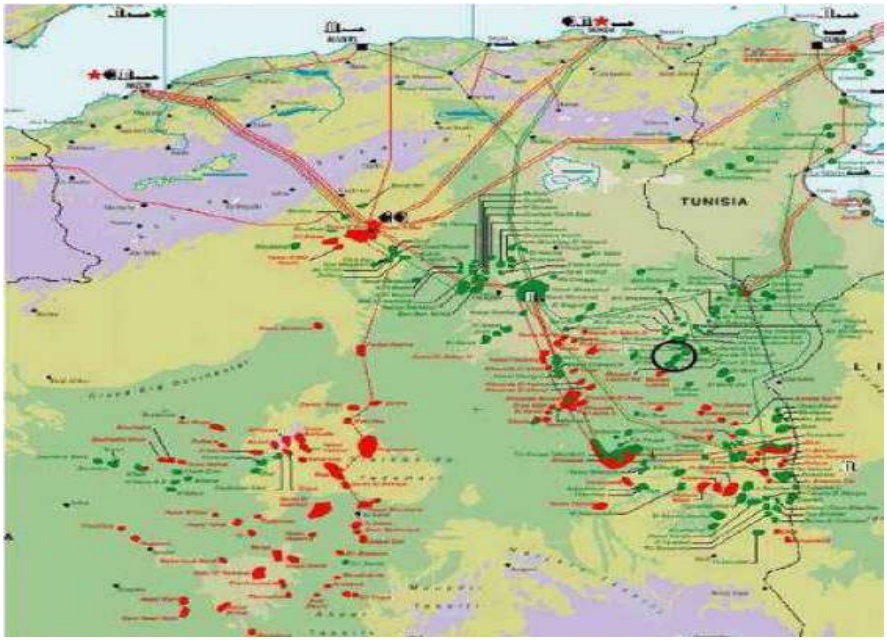


Figure I.1. Emplacement géographique**[1]**

2. Répartition du centre de production et bases de vie :

1. Arrivées des lignes de collecte principales (trunkline) où il y a les gars des racleurs.
2. Slug Catcher.
3. Trains de traitement d'huile.
4. Bac offspec pour le stockage du brut non conforme aux normes.
5. Bacs de stockage du pétrole brut qui est prêt pour l'exportation.
6. Système de traitement de gaz.
7. Système de traitement des eaux pour l'injection.
8. Sale de contrôle.
9. Laboratoire.
10. Bac de stockage pour l'eau d'incendie.
11. Base industrielle.
12. Base de vie OURHOUD.
13. Département hygiène et sécurité environnement (HSE).



Figure I.2. Répartition du centre de production**[1]**

3. Les systèmes d'exploitation au niveau du champ :

3.1.Système de production d'huile :

Le système comprend une collecte de 7 satellites ayant chacun :

- Un manifold de collecte pour un certain nombre de puits.
- Un débit mètre Multi phasique (MPFM).
- Une connexion de manifold vers la ligne principale de raccordement liant le satellite au CPF. [1]

3.2.Traitement de pétrole brut :

Le pétrole brut provenant des différents puits arrive au CPF à travers 7 satellites. Arrivé au CPF, le pétrole brut passe par 3 trains qui assurent principalement :

- Une séparation huile / gaz / eau.
- Un dessalage électrostatique.
- Une stabilisation de brut par distillation atmosphérique.

Le pétrole brut ainsi traité et ramené aux spécifications commerciales (densité, TVR, salinité) est envoyé vers les bacs de stockage.

3.3.Expédition du brut :

A partir des bacs de stockage, le brut est repris par une pomperiez d'expédition et est acheminé par un pipe de 24" vers le pipe 30" OH3 (de SH / TRC) situé à 21Km du

CPF et au point kilométrique 0 (PK 0). De là, le pétrole brut produit est acheminé jusqu'à Haoud EL Hamra.

3.4.Système gaz lift :

Le gaz lift est prévu pour chaque tête de puits BP et comprend un système de distribution individuelle et collective qui suit le système de collecte huile via les satellites correspondants.

3.5.Système d'injection de gaz :

Les trois puits d'injection gaz, sont situés à l'extrême Nord du champ. Une seule ligne principale alimente le manifold au satellite 7 où le gaz est séparé en 3 lignes de distribution alimentant les puits.

3.6.Système d'injection d'eau :

L'eau de production traité et l'eau Albian / Barremian sont mélangées en amont des pompes d'injection d'eau. Les pompes délivrent l'eau vers deux collecteurs, un serve les satellites du Nord et l'autre ceux du Sud. Chacun d'eux alimente les lignes d'injection d'eau des puits via un manifold d'injection d'eau sur chaque satellite.**[1]**

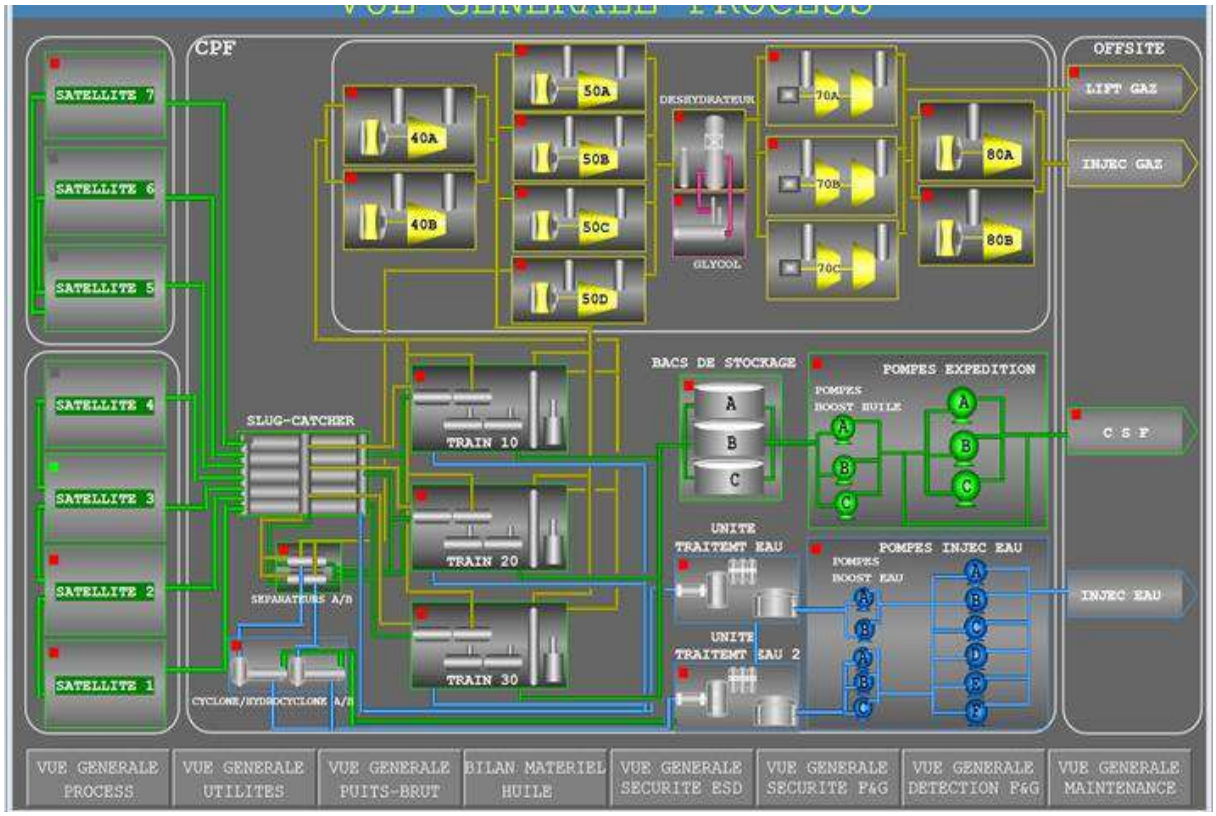


Figure I.3. Les différents systèmes de traitement dans le CPF **[3].**

4. L'organigramme général de l'établissement :

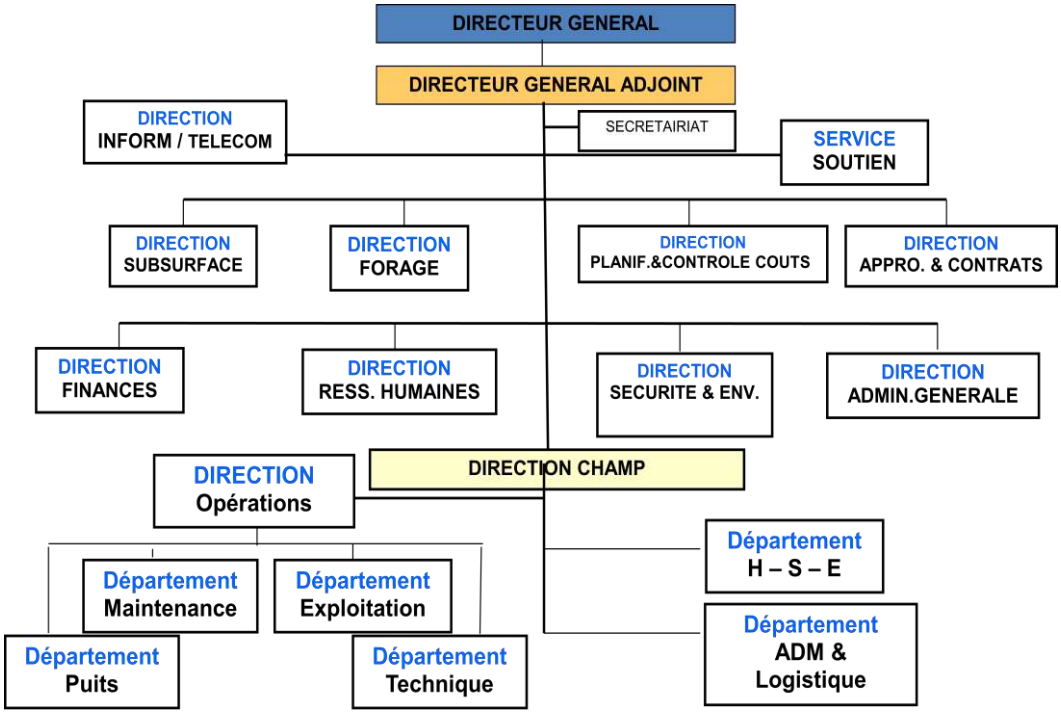


Figure I.4. Organigramme général de l'entreprise **[1]**

5. Présentation du service mécanique du champ Ourhoud:

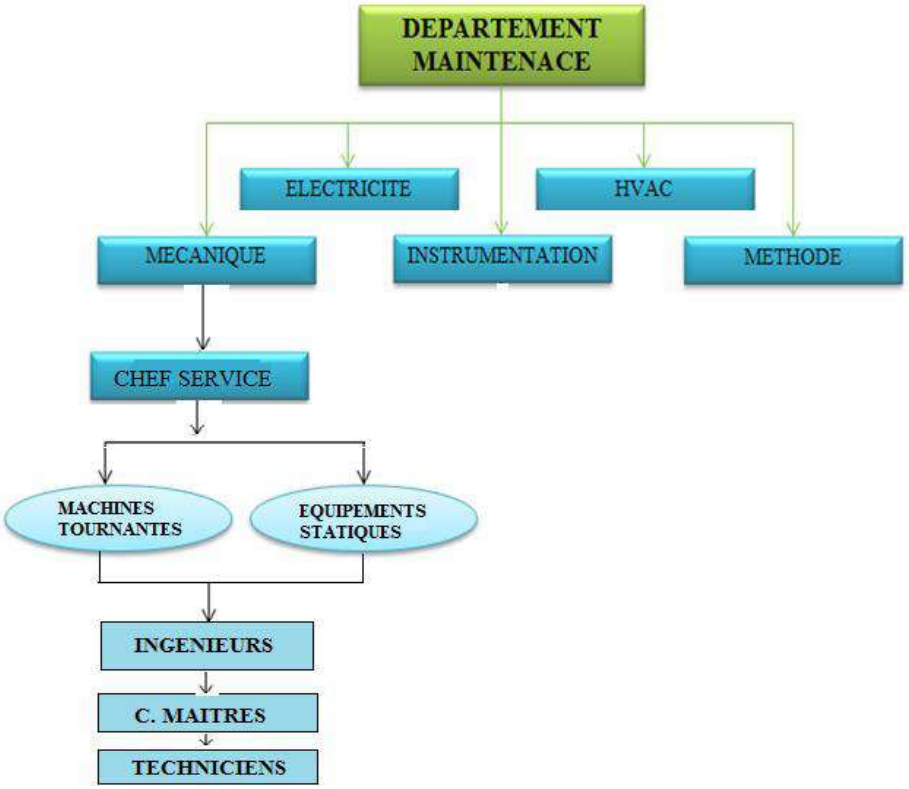


Figure I.5.Organigramme du service mécanique**[1].**

6. Les types de la maintenance effectués par le service mécanique :

Il existe principalement deux types de maintenance effectués au niveau du service mécanique qui sont :

- **Maintenance curative :**

La maintenance curative est celle effectuée après défaillance, ou après altération ou cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir la fonction requise. Ces activités peuvent être:
Des réparations, des modifications ou améliorations ayant pour objet de supprimer la (ou les) défaillance (s).

- **Maintenance préventive :**

La maintenance préventive inclue l'ensemble des contrôles, inspections et les interventions de maintenance effectuées préventivement. Il existe deux types de la maintenance préventive effectuée au niveau du service mécanique :

- **La maintenance préventive systématique** : englobe l'ensemble des taches et opérations calendaires effectué au niveau de l'usine selon uncalendrier approprié afin d'augmenter la durée de vie des équipements.
- **La maintenance préventive conditionnelle** : englobe l'ensemble des taches et opérations effectué au niveau de l'usine selon rapport de fonctionnement anormal de l'équipement (rapport de vibration, de température… etc.).

L'ensemble des activités préventives et curatives de la maintenance effectuées au niveau du champ doivent être saisies et enregistrées dans un logiciel appelé DATASTREAM. Ainsi, l'exécution des différentes opérations de la maintenance doit être accompagné par un permet de travail.

La figure ci-après montre les différents types de maintenance appliqués au niveau du service mécanique :

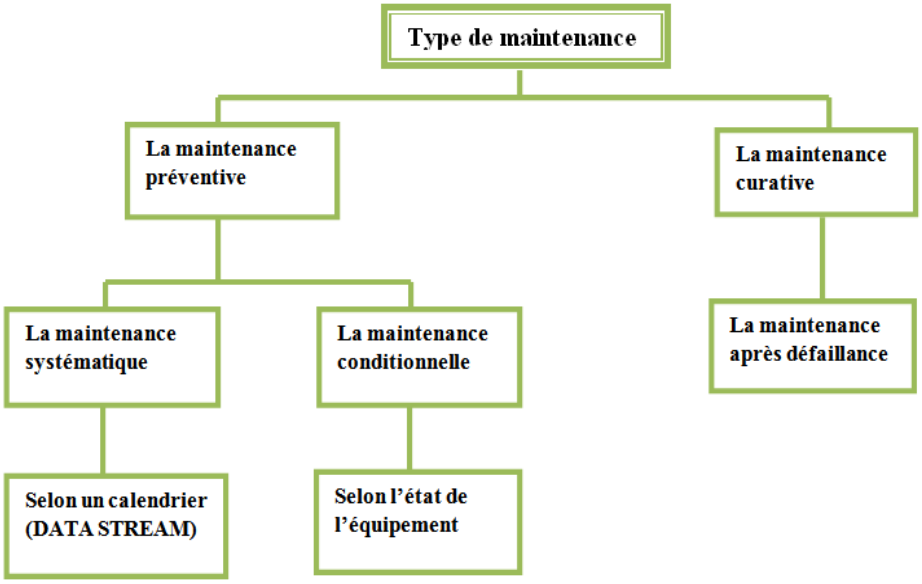


Figure I.6.les types de maintenance effectuées dans le service mécanique**[1]**

1. Description sommaire :

Une turbine est un dispositif rotatif destiné à utiliser l'énergie cinétique d'un fluide liquide comme l'eau ou gazeux (vapeur, air, gaz de combustion), pour faire tourner un arbre solidaire des pales de la turbine.

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

2. Différents types des turbines:[2]

On peut diviser les turbines en deux catégories principales :

2.1.Turbine à vapeur (rendement 0,70 à 0,80) :

L'énergie disponible est la vapeur fournie par de chaudières débitant dans un réseau de vapeur. Noter que ce rendement ne concerne que la turbine seule (organe de détente du cycle de Carnot).

2.2.Turbines à gaz ou turbines à combustion (TAC) : qui comprennent:

- Les turbines à cycle ouvert.
- Les turbines à récupération d'énergie (à cycle combiné).

2.3.Turbines à vapeur :

La turbine est composée d'un stator et d'un rotor. La vapeur admise dans la turbine par la vanne d'admission est détendue dans la tuyère ou sur une rangée de tuyères en parallèle (appelée distributeur ou aubages fixes et dont leurs fonction est d'assurer tout ou partie de la détente et de modifier la direction de l'écoulement sortant de l'étage précédent), avec une température élevée (jusqu'à 680°C pour certaines machines) et une pression élevée (jusqu'a 250 bars pour les plus "grosses" turbines). A la sortie de la tuyère la vapeur est animée d'une très grande vitesse. Elle vient alors frapper les ailettes d'une roue qu'elle entraine en rotations en lui cédant une partie de

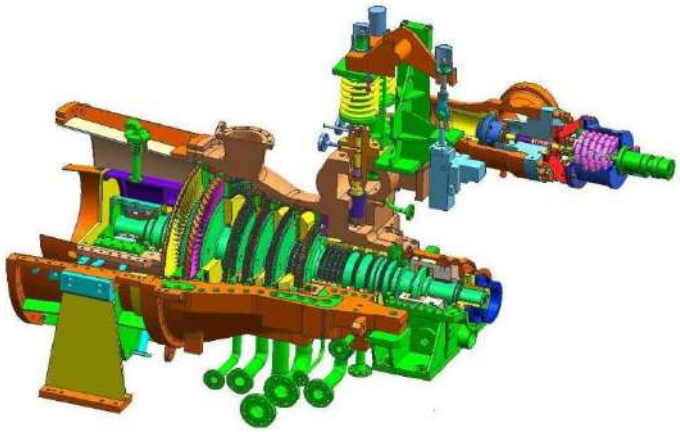


Figure II.1. Vue éclaté d'une turbine à vapeur.

L'énergie thermique qu'elle possède au rotor et donc baisser en pression et en température. Donc à la sortie de la dernière roue, on aura la pression et la température la plus basse.

Et plus elles seront basses et plus le rotor aura récupère l'énergie mécanique nécessaire pour faire tourner l'équipement qui lui est accouple.

Les turbines à vapeur sont classifiées comme suit :

- **Turbine à contrepression (Back pressure turbines) :**

Elle fonctionne avec une contre-pression qui est une pression plus élevée que la pression atmosphérique. Avec une turbine à contrepression, la vapeur reste strictement en phase gazeuse, ce qui signifie que sa pression de sortie est au minimum de quelques bars (3 à 5 bars), mais qu'elle peut être supérieure selon les besoins aval.

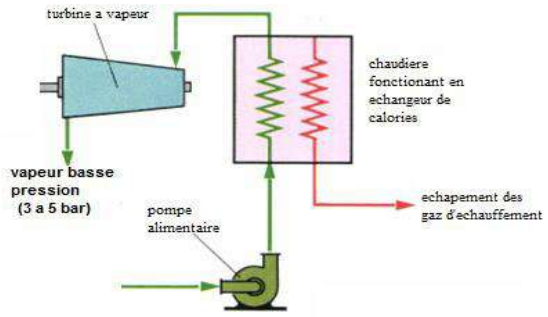


Figure II.2.Schéma d'un turbin contrepression.

- **Turbine à condensation (Condensing turbines) :**

Est une turbine dont la vapeur d'échappement va vers un condenseur et dont la pression est inférieure à la pression atmosphérique. Dans ce cas, l'essentiel de l'énergie disponible sur la vapeur est employée.

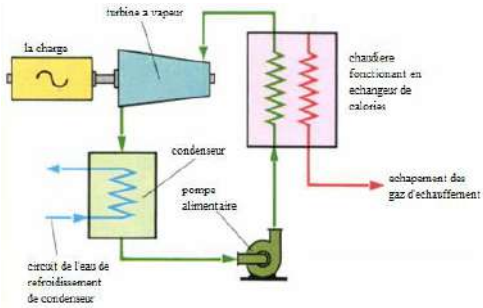


Figure II.3.Schéma d'une turbine à condensation.

- **Turbine a extraction (Extraction turbines) :**

Est une turbine à partir de laquelle une partie de la vapeur est extraite pour l'usage dans un processus d'usine ou pour le chauffage central. La vapeur restante passe dans un condenseur comme dans une turbine de condensation La turbine d'extraction se compose d'une section

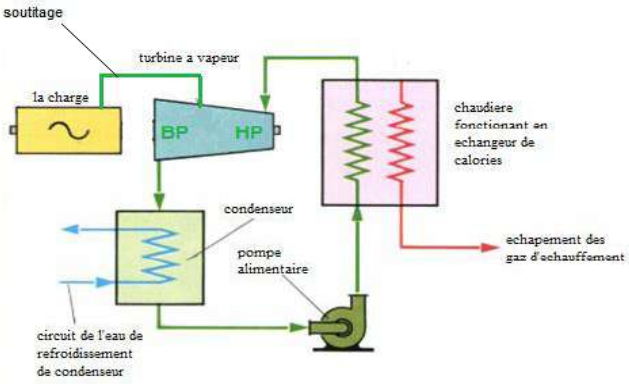


Figure II.4.Schéma d'une turbine à extraction.

Haute pression et d'une section basse pression de vapeur (ou plus) et elle comprend :

- Turbine à condensation et à extraction (Extraction condensing turbine)
- Turbine à contre pression et à extraction (Extraction back pressure turbine)

➢ **Turbines mixtes (Mixing turbines) :**

Sont mues par deux genres ou plus de vapeur admis indépendamment dans la turbine. En appliquant des sources de chaleur différentes. Ce type de turbine peut également être employé pour combiner une chaudière existante et une nouvelle chaudière, qui lui donne des moyens efficaces d'améliorer l'efficacité thermique de l'usine. Elles comprennent :

- Turbine à condensation mixte (Mixingcondensing turbine).
- Turbine a contre pression mixte

(Mixing back pressure turbine).

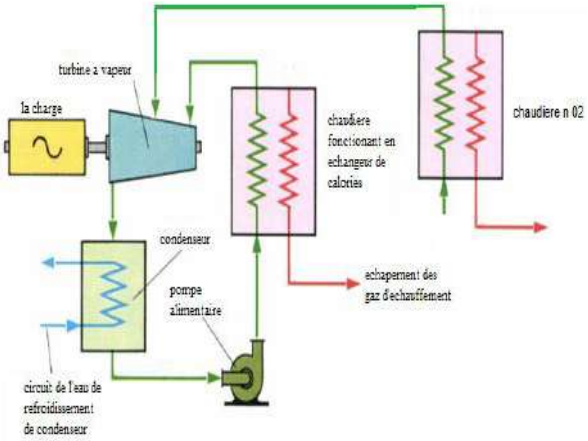


Figure II.5.Schéma d'une turbine à mixte.

➢ **Turbines mixte et à extraction (Extraction and mixing turbine) :**

Est une combinaison d'une turbine d'extraction et d'une turbine mixte.

Le type utilisé dépend principalement de l'équilibre et de la qualité de la vapeur mais aussi des procédures de démarrage et d'arrêt.

2.4.Turbines à gaz :

La turbine à gaz est une machine motrice permettant d'entrainer des alternateurs pour la génération d'électricité, ou des pompes et compresseurs, en général de forte puissance, de façon autonome.

La turbine à gaz est constituée :

- d'un générateur de gaz comprenant un compresseur d'air, une chambre de combustion et une turbine de détente fournissant l'énergie mécanique nécessaire à l'entrainement du compresseur d'air
- d'une turbine de puissance accouplée avec le récepteur.
-Des auxiliaires de la turbine.

Classement des turbines à gaz :

On peut ainsi classer les turbines à gaz en deux grandes familles :

- **Les turbines industrielles :** pouvant être :

a) Turbine a un seul arbre :

Dans ce type de turbine à gaz, le compresseur d'air, les turbines de détente et la machine entrainée sont sur le même arbre. De plus, le moteur de lancement doit entrainer l'ensemble de la ligne d'arbre.

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

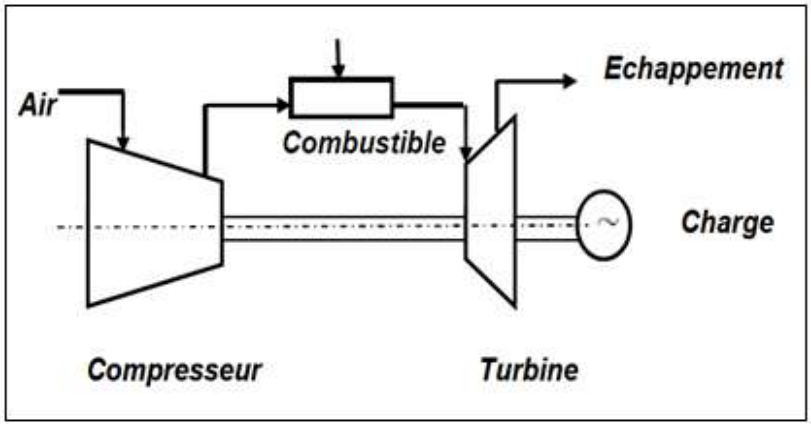


Figure II.6.Schéma d'une turbine à un seul arbre.

b) Turbine à deux arbres :

La turbine de détente est décomposée en deux parties :

- la turbine HP entraine le compresseur d'air et lui seul par l'intermédiaire d'un arbre.
- la turbine BP assure la fourniture d'énergie à la machine entrainée.

La première ligne d'arbre constitue la génération de gaz chaud utilise dans la deuxième ligne d'arbre pour la production d'énergie mécanique.

La turbine à deux arbres est sur le plan mécanique plus complexe que la turbine a un arbre. Par contre, elle permet d'obtenir un meilleur rendement à charge partielle, elle s'adapte particulièrement bien à l'entrainement d'un compresseur dont la prise en charge s'effectue lors de la montée en vitesse et permet de travailler sur une large plage de vitesse.

A noter également la puissance réduite du moteur de démarrage qui n'entraine que le premier arbre.

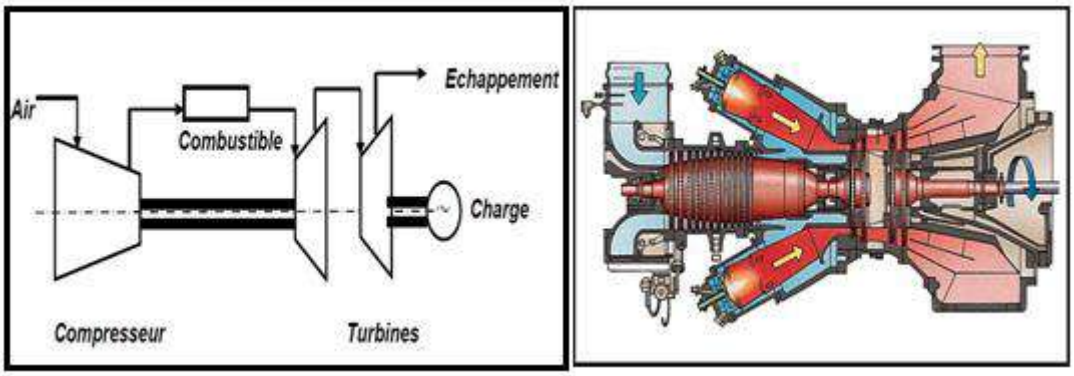


Figure II.7.Schéma d'une turbine à deux arbres.

c) Turbine type « Aviation » (Aéro-dérivative) :

Les turbines type aviation également appelées turbines "jet" sont constituées d'un réacteur générateur de gaz chaud suivi d'une turbine de détente (en place de la tuyère) permettant de produire l'énergie mécanique. Il s'agit donc d'une turbine à deux arbres utilisant les techniques aéronautiques très répandues. La conception est évidemment bien différente des turbines industrielles puisque les critères de poids et d'efficacité sont primordiaux.

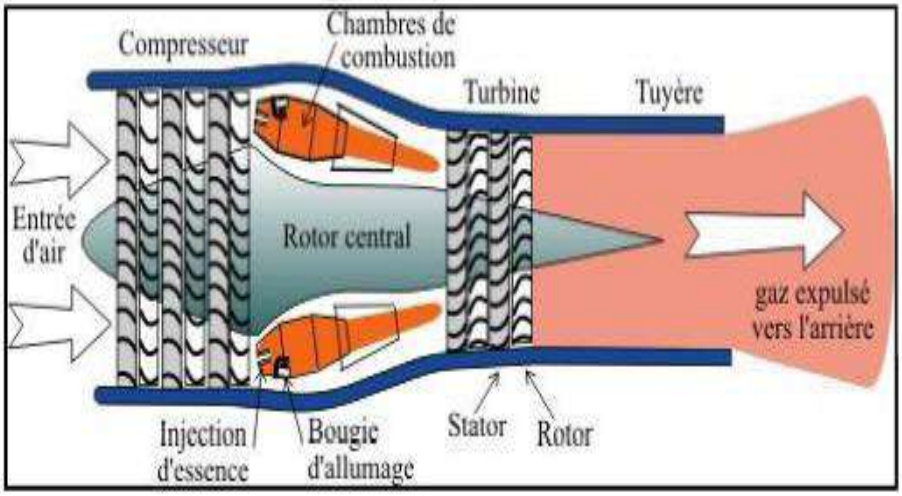


Figure II.8.Schéma d'une turbine de type aviation.

3. Critéres de choix entre turbine a gaz et turbine a vapeur :

Pour la motorisation de grande puissance, les turbines à gaz ou à vapeur remplacent les moteurs électriques qui sont limités en puissance à environ 10 MW.

Les turbines à gaz peuvent brûler une grande quantité de combustibles de qualité et de type très différent, ce qui les rend attractives dans certaines applications par rapport aux turbines à vapeur qui nécessitent la disponibilité de l'eau traité pour la génération de la vapeur.

Spécialement si le fuel gaz est disponible, l'utilisation des turbines à gaz est très intéressanteà cause de leurs fiabilités et disponibilités par rapport aux turbinesà vapeur.

Ainsi, les opérations de maintenance pour une turbine à gaz sont inférieures en fréquence et durée à celle des turbines à vapeur (faillite et disponibilité plus grande).

De plus, dans l'industrie pétrolière on trouve très souvent des turbines à gaz en production de surface tandis que les turbines à vapeur sont fréquentes dans le raffinage ou dans des procès de surface complexes, là où différentes boucles de régulation/stabilisation de températures différentes sont nécessaires.

Comme conclusion concernant la turbine à gaz et à vapeur:

Les critères puissance et fiabilité sont en faveur de la TAG. La souplesse d'utilisation de différents carburants dont le gaz naturel est aussi à faveur de la TAG.

Entre TAV et TAG, la disponibilité de la source d'énergienécessaire pour le fonctionnement de la turbine sera le critère principal de choix.

Au niveau du champ d'OURHOUD, les turbines utilisées dans le procès de l'usine sont des turbines à gaz à deux arbres, Ce choix est expliqué par la disponibilité de la source d'énergie qui est le Fuel Gaz ainsi que la puissance fournie par ce type des turbines.

Pour cela, ce présent travail va s'orienter vers les turbines à gaz a deux arbres et particulièrement : **« la turbine à gaz a deux arbres "MS5002C"**qui se située dans la zone 70 au niveau du CPF du site d'Ourhoud.

1. Localisation de la turbine dans le procès du site :

La turbine à gaz MS 5002C se situe dans le système de l'unité 25 qui sert à la compression du gaz de procès déshydraté afin de le récupérer en têtes des puits.la figure suivante schématise le système de l'unité 25 :

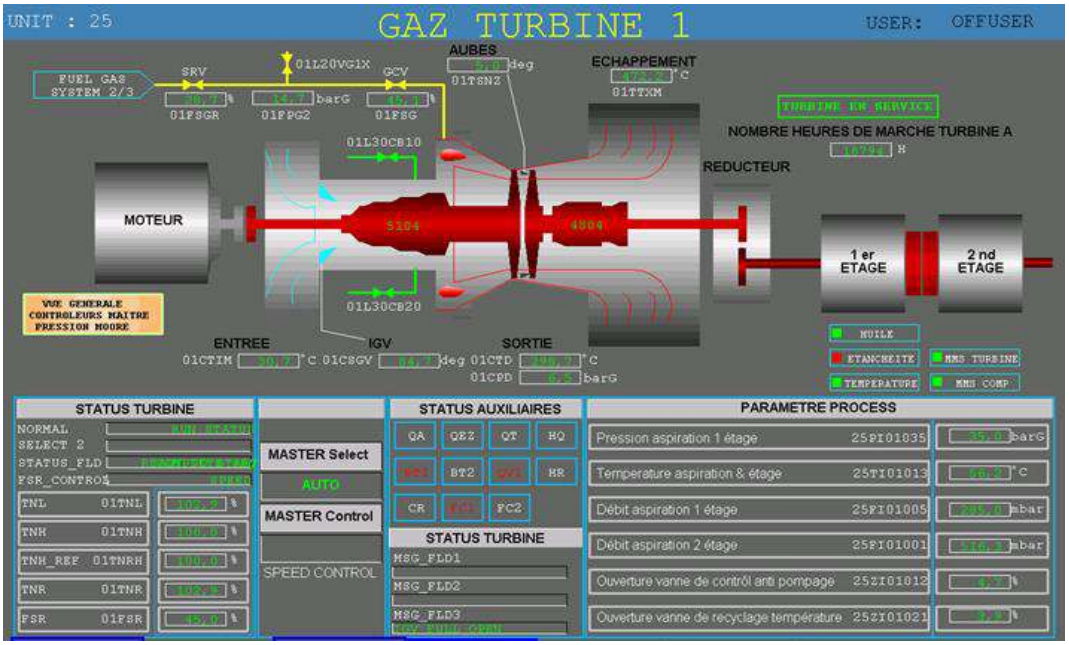


Figure III.1. Schéma de l'unité 25 **[3].**

1.1. Description de l'unité 25 "Compression - Récupération du gaz en tête de puits":

Le système 25 couvre les trains de compression booster et de compression du gaz lift, la tuyauterie principale (collecteur) du gaz lift et la ligne d'écoulement (flow line) du gaz. Il y a 2 trains de compression booster et de compression gaz lift.

Le gaz sortant du collecteur (manifold) du refoulement du compresseur booster et du compresseur de gaz lift est divisé en deux circuits :

- L'un alimente le collecteur d'entrée du gaz lift et la distribution du gaz aux satellites.
- L'autre alimente les deux trains de compression du gaz d'injection.

Le compresseur booster et le compresseur de gaz lift sont à deux étages et sont équipés d'un système à vitesse variable.

Ils sont montés sur un arbre commun et entraînés par la turbine à gaz et sont tous deux équipés d'un refroidisseur (aéro-réfrigérant) complémentaire et d'un ballon (séparateur) d'aspiration à chaque étage.

La pression d'aspiration du booster est de 38 bars et celle de refoulement à 98 bars tandis que la pression d'aspiration du compresseur gaz lift est de 98 bars et celle de refoulement est de 235 bars.

Le compresseur booster et le compresseur de gaz lift sont alimentés par du gaz sec qui provient du dés-hydrateur glycol.

Les installations se composent:

- Compression booster
- séparateur d'aspiration
- compresseur booster du gaz
- refroidissement complémentaire et séparateur de sortie
- Compression du gaz lift:
- séparateur d'aspiration
- refroidissement complémentaire et séparateur de sortie

1.2. Principe de fonctionnement du système :

La vapeur de gaz déshydraté est envoyée au séparateur d'aspiration du booster, équipé d'un système de régulation de niveau pour envoyer le liquide condensé à la torche commune BP.

La pression normale du dés-hydrateur est contrôlée au moyen d'un régulateur de vitesse à régime variable sur l'entraînement de la turbine du booster, incluant la vanne de contrôle anti-pompage du booster et du compresseur du gaz d'extraction.

Le booster et le compresseur ont un arbre d'entraînement commun. Le refoulement du booster est refroidi par l'aéro-réfrigérant complémentaire. La température de sortie est contrôlée au moyen de l'interrupteur marche/arrêt du ventilateur.

Le gaz issu du séparateur d'aspiration du booster est envoyé dans le séparateur d'aspiration du compresseur du gaz d'extraction. Le séparateur d'aspiration du compresseur du gaz d'extraction est équipé d'un régulateur de niveau, le liquide condensé est envoyé à la torche commune BP.

Le refoulement du compresseur de gaz est refroidi dans le réfrigérant complémentaire du compresseur du gaz d'extraction, et la température de sortie est contrôlée au moyen d'un interrupteur marche/arrêt ventilateur.

Les boosters et compresseurs du gaz d'extraction sont équipés d'une vanne de recyclage chaud pour l'opération normale, et d'une vanne de recyclage froid pour les opérations de démarrage ainsi que pour le système d'anti-pompage, et le système de contrôle de capacité du compresseur.

2. Caractéristiques techniques et de fonctionnement pour la turbine à gaz MS5002 C :

2.1.Caractéristiques techniques de la turbine MS 5002C :

Caractéristiques générales	
Série du model de la turbine à gaz	MS-5002C
Application de la turbine à gaz	entrainement mécanique.
Cycle de la turbine	Simple
Rotation de l'arbre	Sens antihoraire
Vitesse de rotation de la roue HP	5100 RPM.
Vitesse de rotation de la roue BP	4900 RPM
Système de contrôle	Mark V SPEEDTRONIC
Température d'entrée	59 F
Pressiond'échappement	14.7 PSI
La section de compresseur d'air	
Nombre des étages	16 étages
Type de compresseur	Débit axial, lourd.
La caisse de l'enveloppe	à plan de joint horizontal
Type des IGV	Variable
La section de la turbine	
Nombre des étages de la turbine	2 (deux arbres)
Découpe de l'enveloppe	horizontal
La section de combustion	
Type	12 chambres de combustion, à flux inverse
Arrangement de chambre	Concentrique autour du compresseur
Détecteur de flamme	4, de type ultra-violet
Autres caractéristiques	
Nombre de paliers	4 paliers
Type de système de carburant	gaz naturel

Tableau III.1. Les caractéristiques techniques de la turbine**[4]**

2.2 Caractéristiques principales de fonctionnement de la turbine :

- puissance spécifique élevée.
- Disponibilité élevée (> 95%).
- Poly combustible (gaz, fuel…).
- exige peu de fluide de refroidissement (eau ou air).
- accepte les conditions climatiques extrêmes (moyennant des adaptations sur l'aspiration d'air et les auxiliaires combustibles et lubrification).
- fonctionnement sous conduite et surveillance automatisée.

- mise en régime rapide (quelques dizaines de minutes).
- Son principal défaut est son faible rendement thermique intrinsèque (30% à 35%).

Le faible taux de rendement de la turbine à gaz est dû au fait que, comme dans un moteur à pistons, une partie de l'énergie fournie par le combustible est nécessaire pour entrainer le compresseur axial et une autre perdue sous forme de chaleur dans les gaz d'échappement.

L'énergie apportée par le combustible (100 %) est répartie de la manière suivante :

- fonctionnement des auxiliaires (10 %)
- fonctionnement du compresseur axial (50 %)
- travail disponible sur la sortie de la turbine de puissance (30 %)
- autres pertes (aspiration et échappement 10 %)

Remarque :

- **Le rendement thermique de la turbine :**

η = Energie à la sortie arbre de turbine / Energie du combustible à l'entrée (pouvoir calorifique inférieur).

3. Les éléments principaux de la turbine :

La turbineMS5002C est faite un assemblage de plusieurs éléments dont les principaux éléments sont :

- ✓ Le compresseur axial d'air.
- ✓ La chambre de combustion.
- ✓ La caisse de turbine (roue de détente HP et de puissance BP).
- ✓ Les auxiliaires de la turbine.

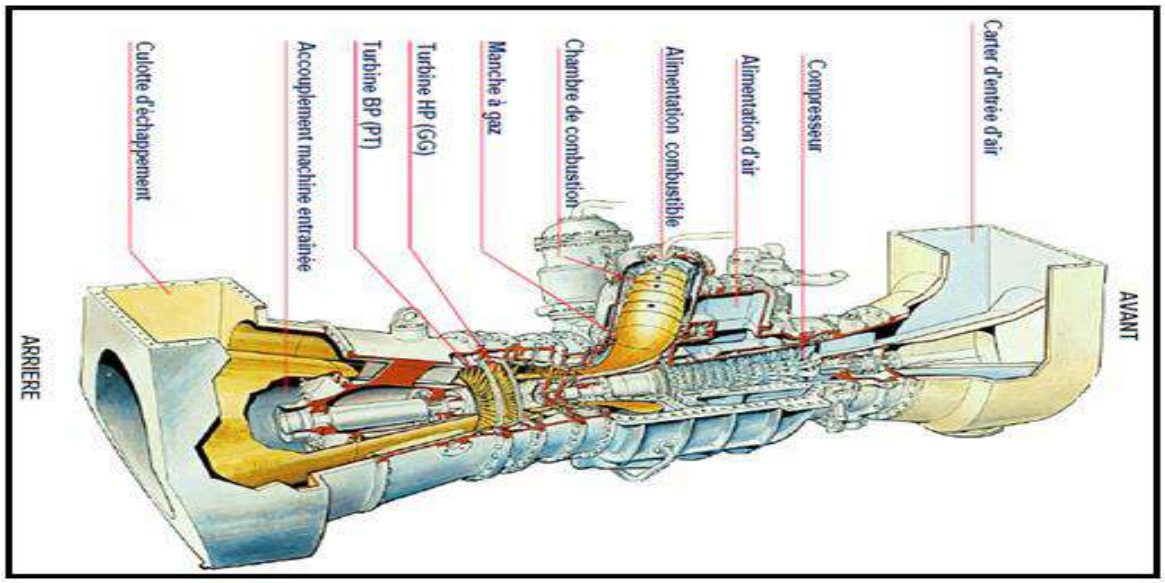


Figure III.2. Les éléments principaux de la turbine.

3.1.Le compresseur d'air :

Est un compresseur axial a **16**étages, sa fonction est de fournir la quantité d'air nécessaire pour la combustion des gaz dans la turbine (en fonction de la charge à fournir) et aussi d'alimenter en air divers circuits de refroidissement.



Figure III.3. Compresseur axial **[5]**

3.2. La chambre de combustion :

Le rôle de la chambre de combustion consiste à brûler un mélange de carburant et d'air et à délivrer les gaz issus de la combustion vers la turbine (transformation de l'énergie chimique potentielle contenu dans le carburant en énergie calorifique).

Le rapport carburant/air pour obtenir une bonne combustion est d'environ 1/15 (richesse stœchiométrique m). On ne peut cependant admettre ce rapport idéal, car la t° en résultant serait trop élevée pour la turbine.



Figure III.4. Chambres de combustion**[5]**

3.3. La caisse de la turbine:

Le rôle de la caisse turbine est de transformer l'énergie calorifique fournie lors de la combustion en énergie mécanique disponible sur l'arbre au niveau des deux roues de la turbine. L'ensemble de la caisse turbine comprend deux roues constituées des rangées d'aubes mobiles et deux distributeurs (directrices).



Figure III.5. La caisse de la turbine **[5].**

4. Principe de fonctionnement de la turbine :

Le fonctionnement de la turbine peut se résumer par l'ensemble des étapes suivantes:

4.1.Admission de l'air ambiant :

La turbine est composée des parties fixes et des parties mobiles. Elle comprend une admission de l'air ambiant filtré et un échappement des gaz brulés.

L'air admis dans la turbine à travers le carter d'entrée d'air est filtré à travers un système de filtration qui se compose de 320 filtres à cartouche.
Ensuite, l'air filtré sera s'échauffer à travers un serpentin (échangeur de chaleur). Ce préchauffage sert à éviter le choc thermique lorsque l'air est admis par le compresseur axial.

.



Figure III.6. Batteries des filtres d'aspiration**[5].**

4.2.La compression de l'air admis :

L'air filtré sera envoyer vers le compresseur axial où il va se comprimer a une pression de au refoulement du compresseur.

La description du compresseur axial ainsi que son principe de fonctionnement se résument comme suit :

Le compresseur axial est composé d'un rotor (qui se compose d'un arbre supporté par des paliers sur lequel sont montées des ailettes rotoriques), et d'éléments statiques (le corps du compresseur appelé également le casing sur lequel sont montées des ailettes statoriques).

Le compresseur axial quantà lui, est un compresseur dont l'écoulement suit l'arbre en rotation (l'écoulement d'air reste toujours axial), il est composé de 16 étages.On appelle un étage, un disque de rotor suivi d'un disque de stator.



Figure III.7.Composants de compresseur axial **[5].**

A l'admission du compresseur, il existe des **IGV (Inlet Guide Valves)** qui sont des aubes a angle variable et qui ont pour rôle d'orienter et de commander le débit d'air à l'admission du compresseur ce qui permet de commander la vitesse de rotation de la turbine et donc la puissance fournit.



Figure III.8. Les IGV de compresseur**[5].**

L'étage rotorique aspire et accélère l'écoulement de l'air grâce à l'énergie transmise par l'arbre de transmission en le déviant par rapport à l'axe du moteur.

L'étage statorique redresse le flux d'air et le ralentir en transformant une partie de l'énergie cinétique en pression via une détente due à la forme du stator.

L'étage suivant fiat la même fonction et ainsi de suite jusqu'à ce que l'air sort du dernier étage avec la pression désirée.

L'air comprimé qui sort de compresseur sert à fournir une source d'air nécessaire pour :

- Assurer la combustion du fuel gaz dans la chambre de combustion.
- Refroidir les parois des directrices et des chambres de combustion, des aubes et des disques de la turbine, qui sont atteintes par l'intermédiaire de canaux à l'intérieur de la turbine à gaz, et par la tuyauterie de raccordement extérieur.
- Fournir l'air d'étanchéité aux joints a labyrinthe des paliers.

L'utilisation d'un compresseur de type axial est justifiée par le flux continu d'air comprimé généré ainsi que le débit fournit par le compresseur qui est très grand par rapport aux autres types des compresseurs.

4.3.La combustion du mélange air/carburant :

La combustion s'effectue dans une enceinte aménagée de façon à assurer l'écoulement d'air, la pulvérisation de carburant et la détente des gaz. Cette enceinte est appelée la chambre de combustion.

La chambre de combustion (C.C.) a pour but de chauffer l'air avant de le livrer à la turbine en brulant un certain débit de carburant dans l'air.



Figure III.9. Les chambres de combustion**[5].**

Dans la turbine MS 5002 C, la chambre de combustion est constituée d'un tube de flamme entouré par une caisse tubulaire appelée pièce de protection qui représente une barrière thermique qui protège le carter contre le rayonnement de chaleur de la paroi du tube de flamme.

La turbine MS 5002C est constituée de **12** tubes de flammes, repérés de **1**à**12,** qui sont repartis circonférentielles et sont connectés entre eux par des tubes d'interconnexion, qui permettent la propagation de flammes du tube à allumeur (le premier et le douzième) aux tubes voisins.

Le carter du tube de flamme (dans la construction tubulaire) est équipé de l'avant par un couvercle extérieur ou un capuchon sur lequel est monté l'injecteur du carburant.

Les tubes de flammes N^0 : 2, 3, 11 et 12sont équipés des détecteurs de flamme qui permettent la détection de l'existence de la flamme dans la chambre de combustion.

Le tube de flamme lui-même à un chapeau avant qui contient des ouvertures inclinées qui permettent à l'air de refroidissement des parois des tubes qui vient du compresseur d'entrer en mouvement hélicoïdal. Cela améliore le mélange entre l'air et le carburant et augmente le temps de résidence du courant d'air dans le tube de flamme.



Figure III.10. Les composants du système de combustion**[5].**

Donc, comme il est mentionné précédemment, l'espace du tube de flamme est divisé théoriquement en trois zones principales :

- La zone primaire
- La zone intermédiaire
- La zone de dilution.

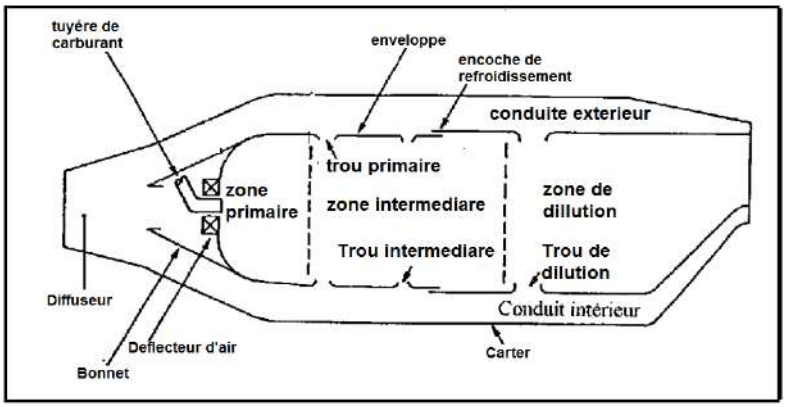


Figure III.11.Les différents zones de la CC.

- **La zone primaire :**

C'est là où l'allumage a lieu d'abord puis la combustion et la température de gaz produit satteint son maximum. L'air qui existe entre la pièce de protection et le tube de flamme, pénètre dans le tube par des trous relativement gros. Les trous sont faits relativement gros exprès pour produire un recyclage intérieur des gaz en forme de tourbillons. Cela étend le temps de résidence de la flamme (ou accroche la flamme) pour permettre d'allumer les nouvelles charges du carburant.

- **la zone intermédiaire :**

C'est là où la combustion est complétée. C'est dans cette zone que la combustion se donne la dernière chance pour se compléter en maintenant la haute température.

- **la zone de dilution :**

L'air frais, qui coule jusqu'à maintenant en dehors du tube de flamme (ou de la chambre de combustion), entre dans le tube (ou dans la chambre) a travers des Louvres ou des encoches, qui permettent a l'air de pénétrer de façon laminaire et parallèle à la paroi du tube.

Comme ça on obtient une couche d'air relativement froide entre les gaz chauds et le métal du tube (ou de la chambre).

L'air est mélange avec les produits gazeux de combustion réduisant ainsi leur température à la valeur requise à l'entrée de la turbine.la température du mélange dans cette zone se réduit jusqu'à l'environ de 500 C^0à l'entrée de la pièce de transition.

Les problèmes liés à la chambre de combustion:

- Problèmes d'injection, de pulvérisation et de symétrie (de carburant liquide) problèm

De non-uniformité de température.

- Problèmes d'allumage tels que la faillite d'allumage au démarrage, le retard

D'allumage, la faillite de propagation de flamme entre les tubes de flamme, d'où l'existence des tubes de flamme non-allume.

Tous ces problèmes ne sont pas acceptables et résultent un avortement dedémarrage.

- Problème de résistance à la chaleur. Les pièces chaudes sont soumises à de contraintes

Thermiques, corrosion à chaud, oxydation, fatigue thermique

- Mauvaise répartition de température à la sortie de la chambre de combustion et à

L'entrée de la turbine.

C'est grave car cela soumet les aubes rotor turbine à descontraintes thermiques cycliques.

- Problème de rendement de combustion ou combustion incomplète.
- Instabilité et extinction de flamme. On peut avoir une extinction riche ou pauvre, si la

Richesse du mélange air-carburant dépasse du haut ou du bas la limite d'inflammabilité.

4.4.La transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique (turbinage):

Le mélange combustible engendré dans la chambre de combustion entre dans une tuyère appelée « **pièce de transition »** qui est reliée directement avec la CC et permet de diriger l'écoulement des gaz de combustion vers la turbine de puissance, avec une très grande vitesse.



Figure III.12. Les pièces de transition**[5].**

Le rôle de la **caisse turbine** est de transformer l'énergie calorifique fournie lors de la combustion à travers **la caisse de décharge** en énergie mécanique disponible sur l'arbre (de la turbine de **détente HP** et de **puissance BP**).

L'ensemble de **la caisse turbine** dans la turbine MS5002Ccomprend deux étages, le premier étage est constitué d'une rangée d'aubes fixes appelé « **directrice à aubes fixes »** ou distributeur suivie d'une rangée d'aubes mobiles appelé « **la roue de la turbine HP(Haute pression)».**

La directrice à aubes fixes a pour but d'accélérer les gaz de combustion, c'est à dire d'augmenter la vitesse de l'écoulement. Cela a lieu au cout de chute de pression. La deuxième fonction est de créer une composante tangentielle de vitesse dans le sens de rotation du rotor. C'est cette composante tangentielle qui pousse les aubes rotor dans le sens de rotation.

Les aubes fixes de la directrice sont montées entre deux anneaux cylindriques. L'anneau extérieur se monte dans le carter turbine. L'anneau intérieur enveloppe l'arbre liant la turbine au compresseur.



Figure III.13.la directrice à aubes fixes**[5].**

Comme mentionné auparavant, la conversion de l'énergie thermique et de la pression, en énergie cinétique a lieu dans l'étage du stator (la directrice à aubes fixes).

L'étage du rotor (la roue HP de la turbine) complète cette conversion, étant donné qu'ici l'énergie cinétique est transformée en énergie d'entrainement de l'arbre, développant, de cette manière, la puissance requise pour entrainer le compresseur axial (l'énergie de compression intérieure, ne peut être employée en tant qu'énergie utile extérieure).

La conversion de l'énergie ne se fait pas complètement au niveau de la roue HP, dont une partie des gaz de combustion se diffuse vers **la roue BP (basse pression) de la turbine** à travers **le diaphragme** en passant par **la directrice à aubes variables** , ou l'énergie cinétique se transforme en énergie d'entrainement pour mettre en marche la machine conduite qui est **le compresseur centrifuge 2BCL** reliée à la roue BP de la turbine au moyen d'un accouplement.

- La directrice à aubes variables a pour but d'accélérer ou décélérer les gaz de

Combustion qui vient de diaphragme vers la roue BP, c'est à dire de commander la vitesse de l'écoulement des gaz et donc la vitesse de rotation de la machine réceptrice (compresseur 2BCL).

- Les aubes variables de la directrice sont commandées à l'aide d'un système

Hydraulique (**vérin hydraulique**) qui actionne une **couronne dentée** liée aux aubes à travers des engrenages.



Figure III.14.les éléments de turbinage **[5].**

- Les roues de la turbine HP et BP sont constituées d'un disque à la périphérie duquel on trouve les pales.

Le disque est solidaire de l'arbre. Les pales de turbine sont rapportées par la fixation dite en pied, qui permet de répartir convenablement les efforts. Les pales rapportées sont, par ailleurs, disposées de façon à réaliser l'équilibrage statique et dynamique du rotor.

Le jeu entre l'extrémité des pales et le carter extérieur est d'une grande importance ; il doit être ajusté pour obtenir un bon rendement (fuite minimum) sans provoquer le contact des pales.

NB :

Pour rappel, les aubes fixes de la directrice sont la première partie de la turbine qui reçoit les gaz chauds venant de la chambre de combustion. Ces aubes ont des canalisations intérieures ou passe l'air de refroidissement.

Les aubes rotor (des roues) sont fabriquées d'alliages réfractaires qui supportent la haute température c'est à dire dont la résistance mécanique ne se détériore pas trop vite avec la température.

Le disque du rotor turbine est fabriqué d'un alliage résistant à la température, un acier fortement allie en général. Les aubes rotor ont aussi des canalisations intérieures permettant le passage de l'air de refroidissement et ils sont fixées dans le disque par une fixation « **sapin** ».

Cette fixation doit résister à une haute charge venant de la force centrifuge sur l'aube.

Cette force est égale à F :

$$F = M . R . W^2$$

Ou:

M = masse de l'aube.

R = distance radiale entre le centre de gravité de l'aube et l'axe du rotor de la turbine.

W= la vitesse de rotation angulaire de l'arbre.

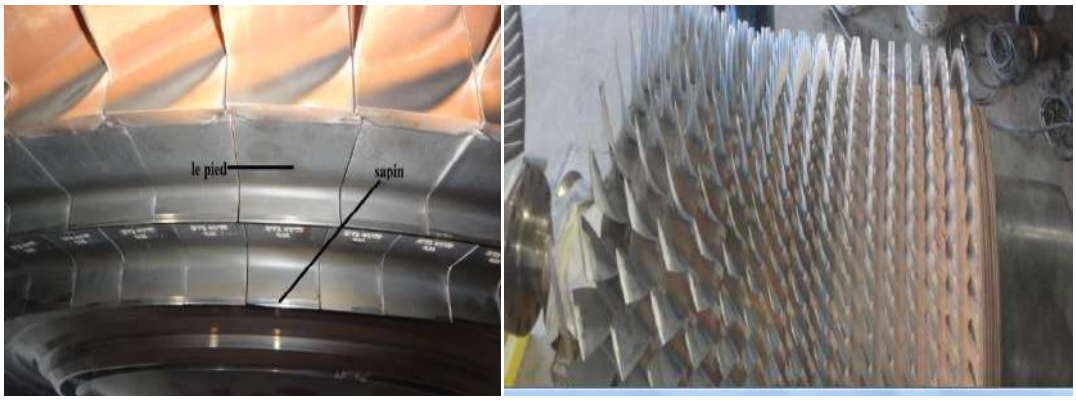


Figure III.15.fixation des pales de compresseur **[5].**

4.5.Echappement des gaz brulés hors de la turbine :

Les gaz de combustion viennent alors frapper les aubes des directrices et des roues qu'ils entrainent en rotations en eux cédant une grande partie de l'énergie thermique qu'ils possèdent aux rotors et donc baisser en pression et en température. Donc à la sortie de la roue BP, on aura la pression et la température la plus basse. Et plus elles seront basses et plus le rotor aura récupère l'énergie mécanique nécessaire pour faire tourner l'équipement qui lui est accouple (le compresseur 2BCL).

A la sortie de l'ensemble mobile, les gaz sont évacués par la tubulure d'échappement appelé également la caisse d'échappement.

5. Aperçue sur le fonctionnement théorique de la turbine à Gaz MS5002 C:

Le cycle de la turbine à gazMS5002 C, c'est-à-dire la succession des états « pressions - températures » qui caractérise l'évolution des gaz (air pur d'abord, puis gaz de combustion) à travers les différents organes de la turbine, est schématisé ci-dessous.

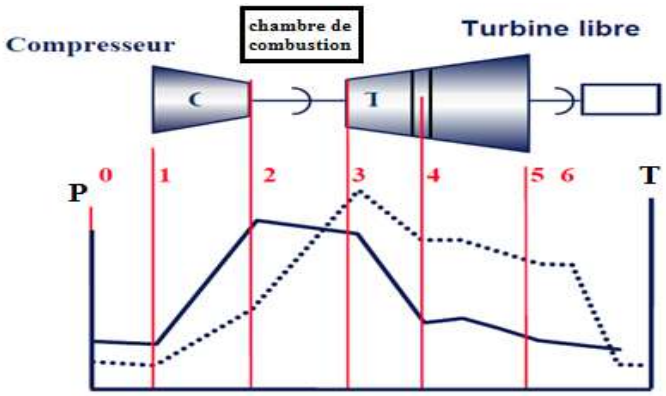


Figure III.16. Schéma de fonctionnement théorique.

Il se décompose :

0-1 : Perte de charge dans le système de filtration d'airavec baisse de température (risque de givrage à l'entrée compresseur)

1-2 : Compression adiabatique de l'air ambiant par le compresseur axial

2-3 : Combustion continue dite à pression constante (isobare) dans les chambres de combustion.

3-4 : Première détente des gaz chauds dans la turbine haute pression.

4-5 : Deuxième détente des gaz dans la turbine basse pression BP

5-6 : Perte de charge dans la culotte d'échappement et la cheminée.

On notera que l'ensemble du compresseur, des chambres de combustion et de la turbine haute pression constitue le générateur de gaz, dont le but est de fournir des gaz chauds et sous pression qui sont utilisés par la turbine de puissance.

Le fonctionnement peut aussi être illustré par ce qu'il est convenu d'appeler le « diagramme d'écoulement des gaz » qui montre l'évolution des paramètres : **pression P (vert), vitesse V (rouge), température t° (jaune),**au cours de fonctionnement de la turbine :

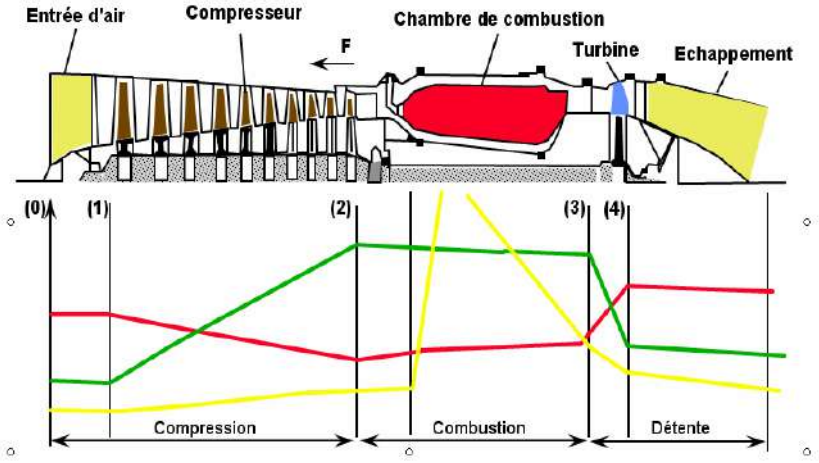


Figure III.17.variation des différents paramètres de fonctionnement.

- **Cycle de Brayton :**

Le cycle thermodynamique d'une turbine à gaz est connu en tant que cycle Brayton. La figure ci-dessous montre le diagramme d'une turbine à gaz. Ce diagramme est utile pour comprendre plus facilement la signification du cycle thermodynamique.

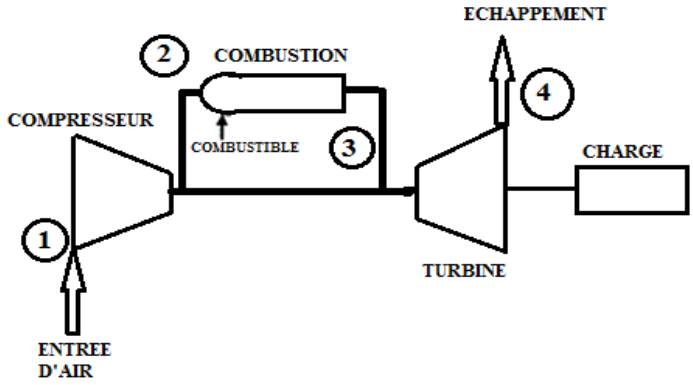


Figure III.18.cycle de Brayton.

(1) : L'air entre dans le compresseur au point (1), qui représente les conditions de l'air atmosphérique.

- Température ambiante (C)
- Pression ambiante (1bar)
- Humidité relative (%)

(1) a (2) : L'air est comprimé à l'intérieur du compresseur et sort dans la condition indiquée au point (2). Pendant cette transformation aucune chaleur n'est transférée à l'air mais la température de l'air augmente.

(2) : Apres avoir traversé le compresseur, l'air entre dans la section de combustion, pratiquement dans les mêmes conditions de pression et de température qu'au point (2)

Le combustible est injecte dans la chambre de combustion par l'intermédiaire d'un bruleur, et la combustion a lieu à une pression pratiquement constante.

(2) a (3) : La transformation entre les points (2) et (3) ne représente pas seulement la combustion. En effet, la température du processus réel de combustion, qui a lieu dans des conditions pratiquement stœchiométriques, atteint localement, dans la zone de combustion a cote du bruleur, des valeurs (d'environ **2000 °C**), qui sont trop hautes pour la résistance des matériaux en aval.

(3) : la température finale de la transformation du point (3), est inférieure, car c'est le résultat du mélange des gaz de combustion primaire avec l'air de refroidissement et de dilution.

(3) a (4) : La transformation entre les points (3) et (4), représente l'expansion des gaz à travers la section de la turbine, qui, comme mentionne auparavant, convertit l'énergie thermique et la

pression, en énergie cinétique et, au moyen de la rotation de l'arbre, en travail utilise pour la compression (interne, non utilisable) et travail utile externe, grâce à l'accouplement avec une machine conduite.

(4) : En aval de la section (4), les gaz sont évacués dans l'atmosphère.

La représentation thermodynamique des événements décrits précédemment est évidente dans la figure ci-après (diagrammes de **pression - volume P-V** et **température – entropie T-S**) :

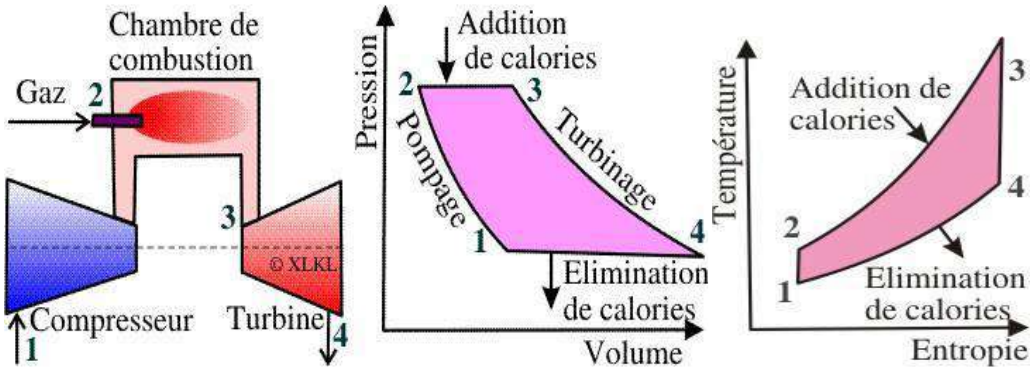


Figure III.19. Diagrammes de fonctionnement.

Donc, le cycle théorique de fonctionnement de la turbine à gaz comprend les phases suivantes :

- Une compression adiabatique qui consomme de l'énergie mécanique ;
- Un chauffage isobare comme pour un moteur Diesel ;
- Une détente adiabatique jusqu'à la pression ambiante qui produit de l'énergie mécanique ;
- Un refroidissement isobare.

6. Les axillaires de la turbine MS5002 C:

Le fonctionnement de la turbine à gaz MS5002C nécessite l'interaction de plusieurs systèmes, dont chaque système à sa fonction désignée. Les auxiliaires de la turbine MS5002 C sont:

- Système d'aspiration d'air et nettoyage turbine.
- Système d'échappement.
- Système d'huile de lubrification, de contrôle et de commande.
- Système de démarrage.
- Système de combustible (Fuel Gaz).
- Système de réfrigération et étanchéité.
- Réducteur principal et le réducteur pour auxiliaires.
- Les enveloppes de confinement.
- Le système de ventilation.

- Le système de refroidissement d'huile.
- Les skids bâtis d'installation.
- Système de contrôle.

a) Système d'aspiration d'air et nettoyage turbine :

Le système d'aspiration d'air de a turbine MS5002 C'est conçu pour :

- Délivrer un air sans poussières, fumées, vapeur d'hydrocarbures pour éviter érosion ou dépôts sur les ailettes, et en quantité suffisante pour fonctionner aux performances contractuelles prévues.
- S'affranchir des conditions atmosphériques locales (protection contre des entrées d'eau de pluie…)
- Respecter les limites locales de bruit ambiant.
- Alimenter le compresseur sans vibrations aérodynamiques.
- Arrêter les nuisances locales (insectes).
- Piéger autant que faire se peut les chutes d'objet.

Le système de filtration de la turbine à gaz MS5002C se compose des éléments suivants :

- Batterie de filtres.
- Les conduits.
- Les silencieux.
- Les coudes.
- Le plenum d'entrée.
- Bell-mouth(convergent d'entrée du compresseur)

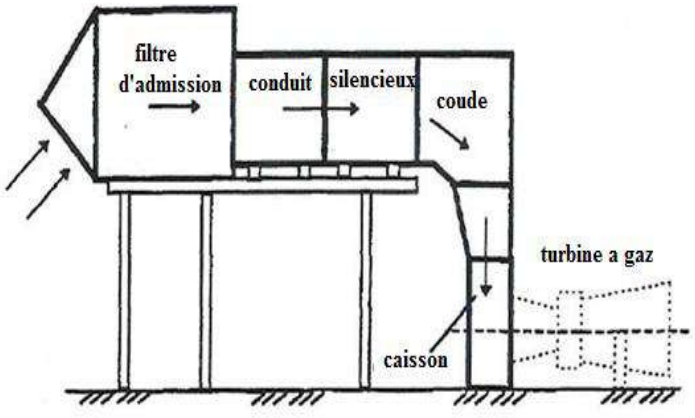


Figure III.20. Le système d'aspiration **[1].**

- **Batterie de filtres** :

Pour protéger les ailettes de l'érosion due à des solides/poussières en suspension, l'air est filtré dans une batterie de filtres placée à l'aspiration. A batterie de filtres de la turbine MS5002 C est de type : « Down Flow With Horizontal Cartridge »

Le système de filtration est composé de 320 filtres fins a cartouche de 5µm qui protègent les turbines contre les grosses particules afin d'augmenter le délai de salissure de ces éléments.



Figure III.21. Les filtres à cartouche**[5]**.

On trouve donc en amont de ce système :

- Un grillage anti-oiseau et anti-insecte.
- Un filtrage par inertie.
- Un demister : sert à séparer les gouttelettes d'eau supérieure à 20 µm
- Un préfiltre : I servent à piéger les particules entre 10 et 5 µm
- Un coalesceur : pour recueillir et évacuer/drainer l'eau amenée par l'air.
- Bell-mouth (volute d'entrée) : sert à éviter des vibrations aérodynamiques à l'entrée du Compresseur d'air.

Les filtres fins à cartouches autonettoyantes :ils ont la vocation de ralentir l'encrassement, ils arrêtent les particules fines.

Dès que la pression différentielle atteint le seuil préréglé, le transmetteur de pression différentielle lance la séquence de nettoyage. Une vanne solénoïde ouvre l'air sur un Venturi, ce qui détache à contrecourant par effet de choc tous les dépôts collés à la paroi du filtre.

L'air provient d'un soutirage du compresseur air des turbines après refroidissement.

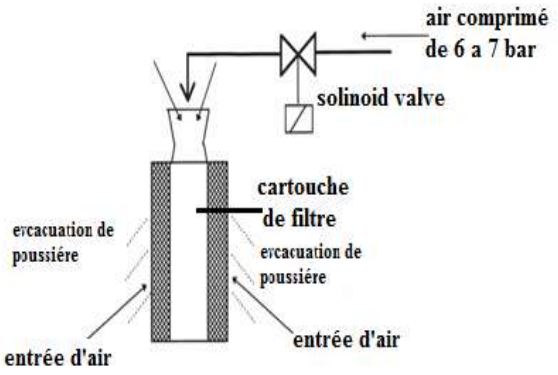


Figure III.22.la vanne solénoïde **[1].**

- **Système de nettoyage :**

Lorsque le compresseur s'encrasse par déposition de poussières diverses (fouling) son rendement **diminue**, par conséquence la puissance fournie par la turbine diminue également, et nécessite un nettoyage après une diminution de sa performance de 5%.

Il existe 2 types de nettoyages :

Le nettoyage en marche (on-line washing) :

La séquence de nettoyage en marche consiste à démarrer la turbine sans l'allumer et à injecter le mélange nettoyant (gamlene mécanique) par séquences préréglées. Quand le réservoir du « cleaner » est vide la turbine s'arrête et le rinçage à l'eau déminéralisée commence avec les mêmes séquences.

En fin de rinçage, la turbine est démarrée et reste au ralenti le temps de séchage puis est à disposition pour son usage normal.

Le nettoyage à l'arrêt (crankwashing ou off-linewashing) :

Le système de nettoyage sert à injecter de l'eau et de produit nettoyant (gamlene mécanique) en amont des IGV au moyen d'une couronne circulaire de gicleurs.

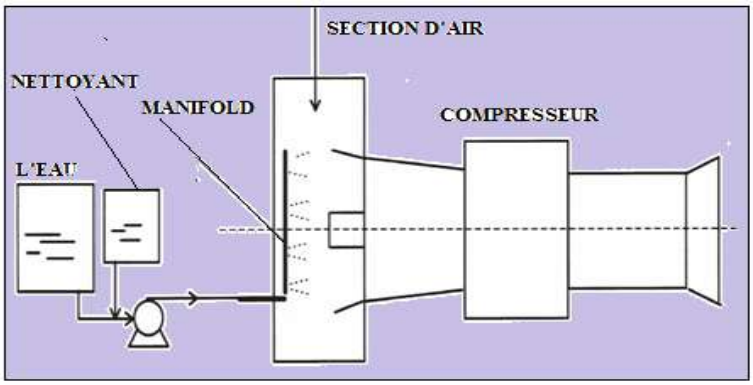


Figure III.23. Système de lavage du compresseur **[1].**

b) Système d'échappement :

Il permet d'assurer les fonctions suivantes :

- Maintenir le niveau de bruit admissible par a législation locale.
- Compatibilité avec la puissance contractuelle demandée et le débit de fuel-gaz
- Protection du personnel contre les points chauds.
- Assurer un débit régulier ne perturbant pas la turbine (diminution des turbulences, fuites et limitation des contraintes thermiques de structure)
- Assurer une température statique constante lors des variations de régime pour éviter des contraintes thermiques internes (thermal transient).
- Permet la main tenabilité des points critiques à surveiller (inspection facile).

Le système d'échappement de la turbine MS5002Cest de type vertical, il est constitué des éléments suivants :

- diffuseur de sortie (exhaust plenum).

- Conduits d'échappement et coude.
- Silencieux.
- Tuyau d'échappement / cheminée.
- Soufflets de dilatation.
- Isolation thermique et acoustique.
- Plateformes et escaliers/échelles de service.
- Structure de maintien.
- Auxiliaires (joints d'étanchéité…).

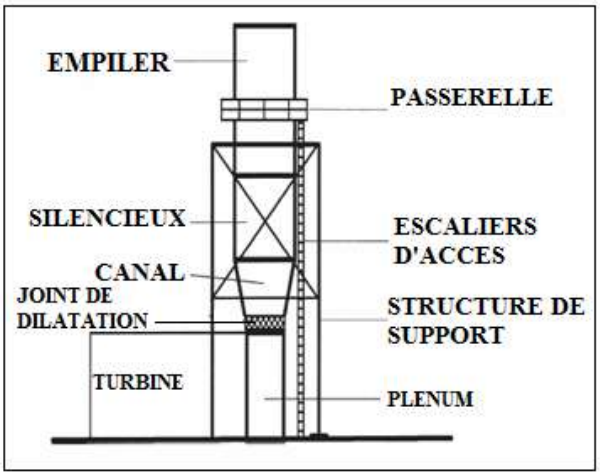


Figure III.24. Le système d'échappement **[1].**

c) Système d'huile de lubrification, de contrôle et de commande:

➢ **Système d'huile de lubrification :**

Le circuit d'huile de la turbine assure les fonctions : stockage de l'huile, alimentation sous pression, filtrage, récupération, refroidissement, dégazage et contrôle de fonctionnement.

Il assure la lubrification des pièces en contact en mouvement dans la turbine à gaz. C'est un système d'huile sous pression en boucle fermée, comprenant un bac à huile, des pompes, des réfrigérantes huiles, filtres, vannes et des dispositifs divers qui contrôlent et protègent le système.

L'huile de graissage conditionné par le système circule jusqu'à atteindre les éléments suivants :

- Les paliers de la turbine.
- La machine entrainée (le compresseur centrifuge 2BCL).
- Différents réducteurs (principal, auxiliaires …)…etc.

Le système de l'huile de lubrification comprend les éléments suivants :

Réservoir d'huile :

Il est installé dans le bâti de la turbine (base plate). La quantité d'huile est de **23500** L de type **TORBA46**. Il est équipé d'un réchauffage installé pour maintenir la température de l'huile pour le démarrage de la turbine.

Pompes à huile :

Le système de graissage de la turbine est équipé de 3 pompes :

- **Pompe principale :**

C'est une pompe volumétrique à engrenage, montée et entrainée par le réducteur auxiliaire. Elle pompe l'huile de graissage du réservoir dans le réfrigérant et les filtres avant d'alimenter les circuits de lubrification et contrôle durant la marche normale.

- **Pompe auxiliaire:**

Elle est entrainée par un moteur à courant alternatif, sa fonction est de fournir de l'huile aux paliers et l'accouplement lors du démarrage et l'arrêt de la turbine quand la pompe principale ne peut fournir une pression suffisante pour le fonctionnement en conditions de sécurité.

- **Pompe de secours :**

La pompe centrifuge d'huile de graissage de secours fonctionne en cas ou la pompe auxiliaire a été forcée hors service ou elle est incapable de maintenir la pression adéquate de l'huile de graissage. Elle est entrainée par un moteur à courant continu (alimentée par des batteries).



Figure III.25.Les moteurs de pompes auxiliaires de lubrification**[5].**

-Les Réfrigérants :

Il existe deux réfrigérants de type huile-aire, c,a,d, aéros-réfrigérant sa air forcé, qui ont pour but de refroidir l'huile de lubrification qui sort de la caisse d'huile.

-Les filtres :

Le système de graissage de la turbine est équipé de deux filtres avec un boisseau de transfert en marche et une vanne de contrôle de pression qui permet de maintenir le circuit sous pression en cas

de colmatage des filtres (aussi au démarrage avant que l'huile ne soit à la bonne température). Les éléments sont généralement de 10µm.

- **Les circuits de distribution (headers) et de retour:**

Pour transporter l'huile entre la caisse et les organes a lubrifiés.

- **Les accumulateurs de pression.**
- **Instrumentation de contrôle et de sécurité :**

Comme les alarmes et shut downs des niveaux du réservoir d'huile (LSL/LSLL, LSH/LSHH), les thermostats, les Pressostats, les indicateurs de pression local et distance Indicateurs de température local et distance… etc.

➢ **Système d'huile de contrôle et de l'huile hydraulique:**

Le circuit d'huile de contrôle a pour but de commander les vannes hydrauliques (circuit de pilotage) qui peuvent avoir des positions différentes dans les phases démarrage, fonctionnement normal, arrêt normal et arrêt d'urgence. Dont la pression de l'huile de commande est égale à celle de lubrification.



Figure III.26.Moteur de l'huile hydraulique **[5].**

Le circuit d'huile hydraulique a pour but de commander les organes à commande hydrauliques qui peuvent avoir des positions différentes tels que les IGV de compresseur axial, la directrice à aubes variables, le vireur…etc.

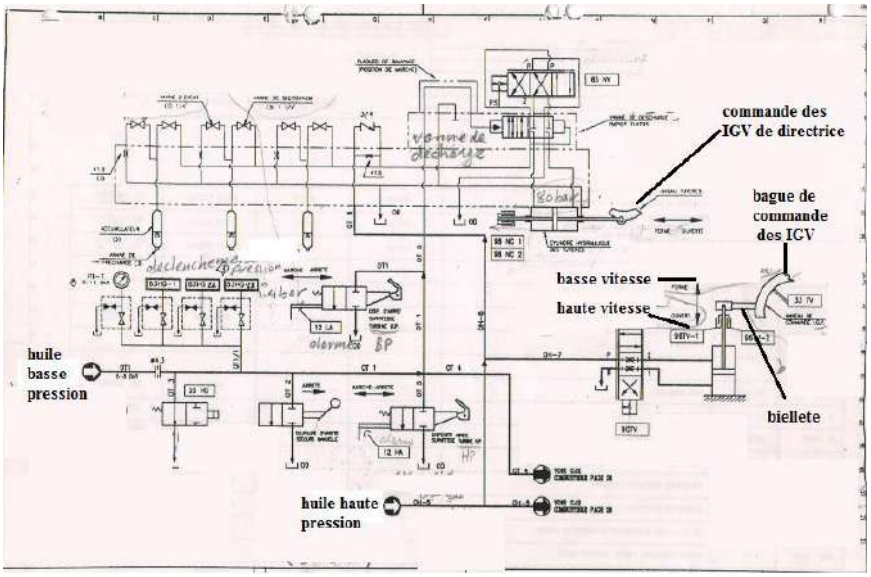


Figure III.27.Schéma de l'huile de commande**[1].**

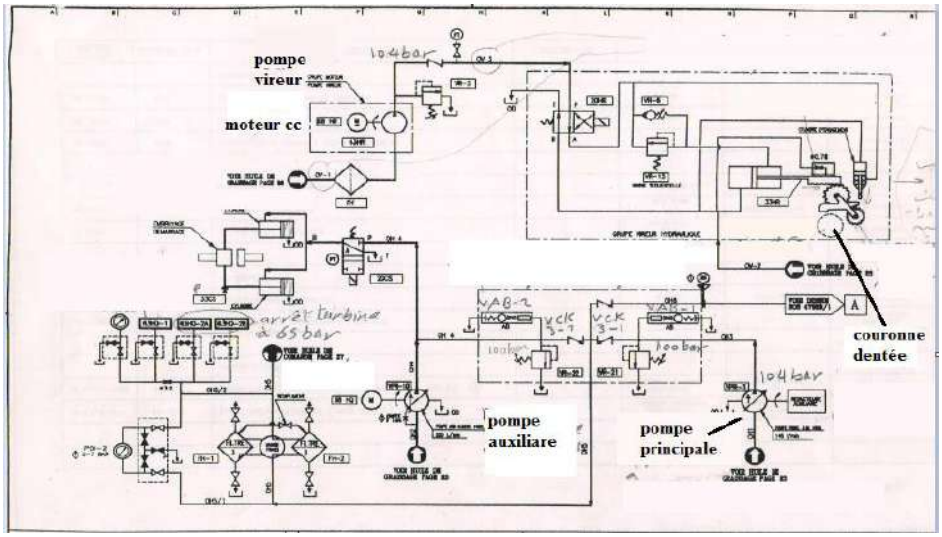


Figure III.28.Schéma de l'huile hydraulique **[1].**

d) Système de démarrage :

Le but principal du système de démarrage est d'accélérer la turbine jusqu'à la vitesse minimale d'autonomie. Le lancement de la turbine est assure par le moteur asynchrone qui fonctionne au travers d'un convertisseur de couple pour assurer le couple de démarrage nécessaire pour la turbine.

Le moteur de lancement fait croitre la vitesse du rotor de la turbine jusqu'à 22% de sa vitesse nominale dans une minute, l'ensemble se stabilise pendant les cinq minutes qui suivent à la vitesse de 22%, afin de permettre le balayage des gaz résiduels, et l'alimentation avec le gaz combustible.

Apres le balayage, la flamme est ensuite enflammée, et le processus de démarrage commence l'accélération jusqu'à une vitesse de 60% de la vitesse nominale. Le passage de 22% à 60% se fait dans environ 8mn.

A cette vitesse le moteur de lancement est découplé du compresseur axial et la turbine atteint la phase de son autonomie, ou elle accélère jusqu'à sa vitesse nominale.

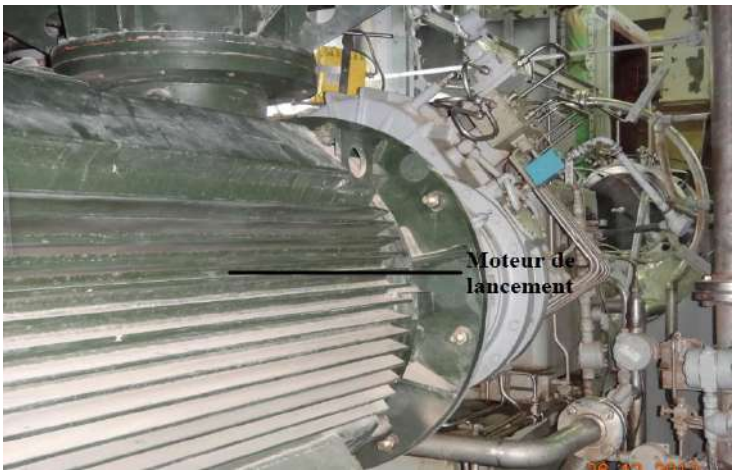


Figure III.29.le moteur de lancement **[5].**

En effet, La turbine à MS5002Cutilise un convertisseur de couple et un embrayage à mâchoires, entre le moteur de lancement et la boite d'accessoires. Apres démarrage de la turbine, les mâchoires sont débrayées et le moteur de lancement et le convertisseur de couple sont séparés du système et arrêtés.



Figure III.30. Embrayage et le convertisseur de couple**[5].**

Le convertisseur de couple est introduit entre le moteur de lancement et la turbine à gaz afin de permettre au moteur de lancement de tourner dans son régime économique, tandis que la sortie du convertisseur de couple fournit la relation programmée entre le couple et la vitesse requise par la turbine en démarrage.

Le convertisseur de couple entraîne aussi la turbine dans le cycle de lavage du compresseur.

- **Post refroidissement de la turbine à gaz MS5002 C:**

Le post refroidissement de la turbine est réalisé par l'incorporation d'un vireur hydraulique qui se compose d'un rochet (ratchet), une crémaillère et un cylindre à double effet

- A l'aide du vireur, et pendant 10 secondes, l'arbre de la turbine est tourne 47 degré vers l'avant, puis le rochet se dégage pour 4 sec.
- Ce cycle est refait toutes les 3 minutes.
- Le cycle sera répété pendant 2 heures.

Donc, Le moteur de lancement sert alors pour le démarrage de la turbine, pour le lavage du compresseur, et pour la ventilation après un faux démarrage. Le vireur, par contre, aide au début de démarrage pour le roulage de l'arbre «shaft break away ». Il sert aussi pour tourner l'arbre pendant l'alignement de la machine.



Figure III.31.le moteur vireur**[5].**

- **Avortement de démarrage :**

Le démarrage peut être arrêté, ou avorté, pour plusieurs raisons, par exemple, la faillite d'allumage à n'importe quel niveau, c'est-à-dire faillite d'allumage de tube de flamme doté d'allumeur ou faillite de propagation de flamme de tube en tube.

La, la séquence de démarrage est arrêtée, et la turbine entre tout de suite dans une séquence de ventilation pour chasser le carburant de la turbine. Le démarreur sert à tourner la turbine sur une vitesse convenable (20%) pour créer un courant d'air suffisant pour chasser le carburant. La machine sera prête pour un autre démarrage.

e) Système de combustible (Fuel Gaz) :

La turbine à gaz MS5002C fonctionne avec le fuel gaz extrait du gaz naturel de gisement provenant du traitement des gaz associés de brut au niveau du champ d'Ourhoud.

Le fuel gaz utilisé est disponible et une fois traité a de bonne propriétés en terme d'allumage et de stabilité de flamme.

- **Système de commande de combustible:**

Le rôle de ce système est d'assurer l'alimentation des chambres de combustion par le combustible (le gaz naturel pour le cas de cette turbine), avec la pression et le débit approprie pour satisfaire à toutes les exigences de lancement.

On trouve en aval du système de filtration (**demister**) une vanne multifonctions (arrêt de sécurité et contrôle de pression) **SRV** (stop pressure regulating valve) et une vanne de contrôle de la puissance **GCV** (Gas control valve) commandées électriquement par le tableau de contrôle de la machine.

- **Vanne SRV d'arrêt et de contrôle de pression :**

Elle contrôle et maintient une pression différentielle constante entre la pression de sortie de l'air de compresseur turbine GG et la pression de fuel-gaz lue en amont de la GCV.

Ceci permet une bonne condition d'allumage et une bonne combustion dans les phases transitoires.

Elle est la vanne d'isolation lors d'arrêt manuel ou d'urgence.

Pour des raisons de sécurité une vanne de purge à l'atmosphère est installée entre les 2vannes SRV et GCV.

Dans la séquence de démarrage, la SRV n'est ouverte que lorsque le compresseur de la turbine a atteint 20% de sa vitesse normale. Ceci afin que le balayage de la chambre de combustion et de l'échappement soit proprement terminé.

- **Vanne GCV de contrôle de charge :**

Elle contrôle la quantité de gaz envoyée sur les brûleurs en fonction de la charge demandée. Sa position est régulée.

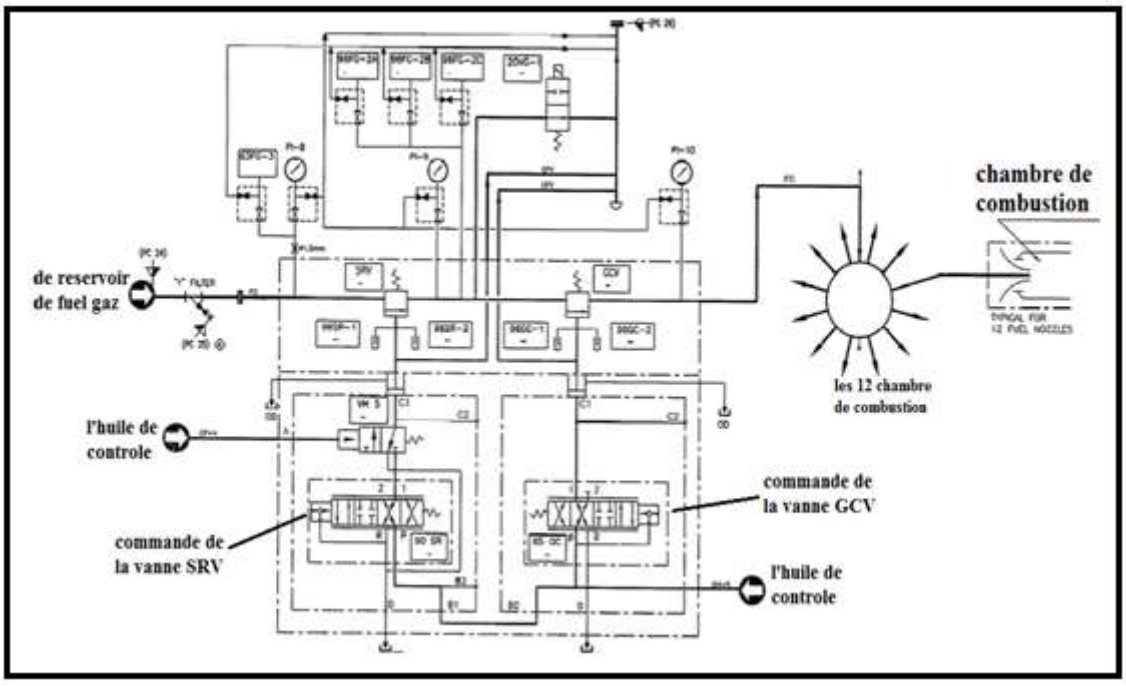


Figure III.32.schéma de commande du système de combustible **[1].**

f) Système de réfrigération et étanchéité :

Dans la turbine à gaz MS5002C, certaines parties sont exposées à des contraintes thermiques très élevées. Leur refroidissement est indispensable, afin d'éviter leur détérioration.

Pour cette raison, une partie de l'air frais soutirée du compresseur axial, ainsi qu'une deuxième partie aspirée de l'atmosphère sont envoyées pour le refroidissement des endroits critiques, et servir aussi à l'étanchéité (pressuriser les joints d'huile des paliers).

L'air comprimé se prélève à travers un piquage au niveau de 10^{em} étage du compresseur axial et sert à :

- La réfrigération (refroidissement):
  - Des parties chaudes des premiers étages, c.-à-d. les ailettes des turbines et aubages de distributeur (directrice)
  - Des structures turbine (chambres de combustion et le carter du rotor) et des échappements.
- L'étanchéité d'huile des paliers.

- **Le refroidissement de la turbine :**
- **Refroidissement des chambres de combustion :**

L'air venant de 10^{em} étage de compresseur vire vers l'avant et passe àcontre-courant entre la pièce de protection et le tube de flamme des chambres de combustion. Cela rend un service double. D'abord l'air est préchauffé avant la combustion, ce qui améliore la performance et la stabilité de combustion. Deuxièmement la pièce de protection elle est protégée contre la chaleur car l'air va la refroidir.

Les tubes à flammes sont équipés aussi des « Louvres » qui ralentissent l'écoulement de l'air à contre-courant ce qui permet d'augmenter le temps et la surface d'échange entre l'air de refroidissement et les parois des tubes de flamme.

Ensuite, l'air de refroidissement entre en mouvement hélicoïdal à travers les ouvertures inclinées des tubes de flamme et participe à la combustion du mélange air/combustible.

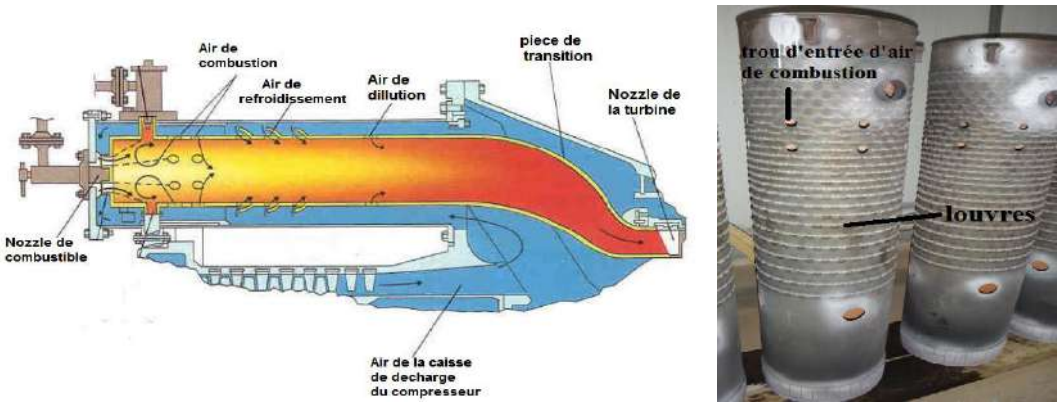


Figure III.33.refroidissement des chambres de combustion **[5].**

- **Refroidissement des ailettes des roues et aubages des directrices :**

Le refroidissement des ailettes des roues et des aubes des directrices est d'une importance considérable puisqu'il permet d'augmenter le rendement et la vie de ces composants.il est réalisé par circulation d'air prélevé au niveau du 10 ^{em} étage du compresseur. Ainsi, on refroidit les aubes distributeurs, les disques de turbines et les pales de turbine par la technique montrée dans la figure ci-dessous :

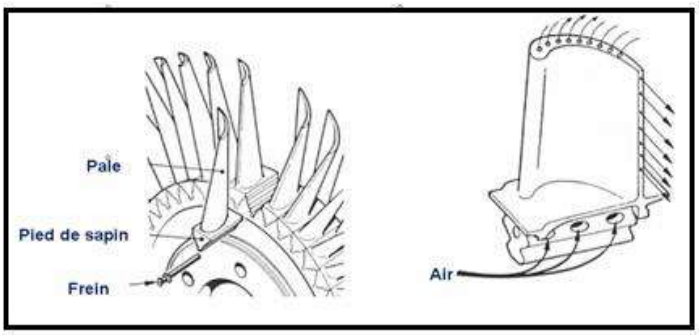


Figure III.34.refroidissement des ailettes **[1].**

- **L'étanchéité d'huile des paliers :**

L'air d'étanchéité est nécessaire pour éviter les fuites d'huile des labyrinthes d'étanchéité au niveau des paliers de la turbine vers les parties très chaudes.il est extrait de 10^{em} étage du compresseur sous pression (p= ?????) et se diffuse vers les paliers de la turbine ce qui permet de créer un barrage d'air aux extrémités des paliers qui empêche les fuites d'huile de lubrification vers l'extérieur.

La figure suivante montre la circulation de l'air d'étanchéité au niveau de la turbine :

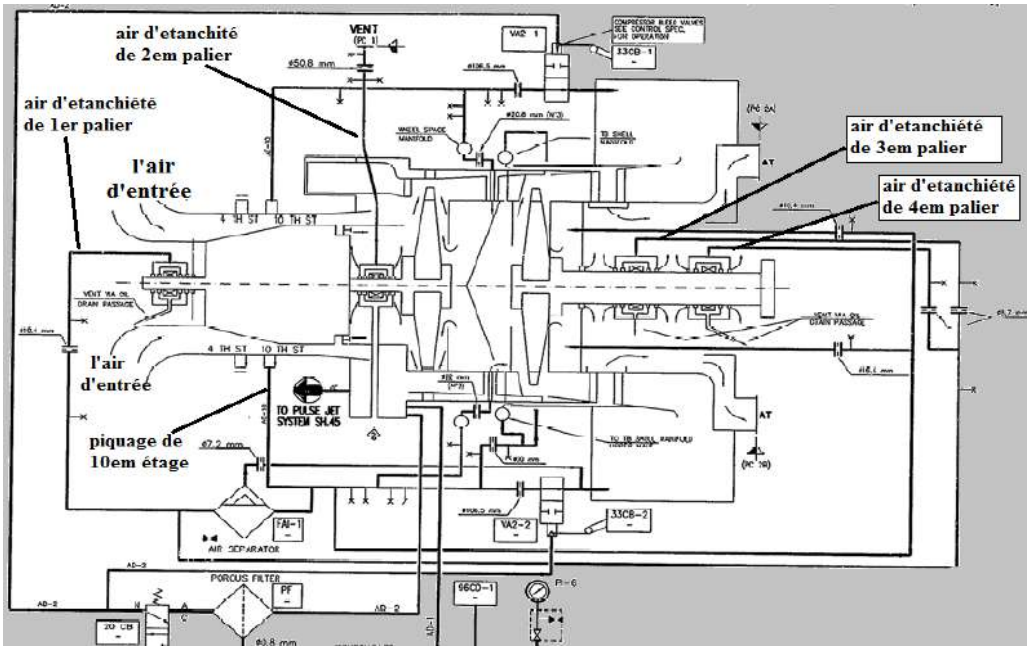


Figure III.35. Schéma de l'air d'étanchéité des paliers **[1].**

Le retour d'air vicié des labyrinthes des paliers d'huile est récupéré dans le système de récupération de la vapeur d'huile (des différents circuits).

g) Le réducteur des auxiliaires et le réducteur principal:

- **Le réducteur des auxiliaires :**

Le réducteur des auxiliaires à engrenages est utilisé pour entrainer les auxiliaires (pompes à huile, pompes à combustible etc.…).

La turbine à gaz MS5002C a une seule boite auxiliaire avec plusieurs arbres de sortie permettant d'entrainer les diverses pompes et l'arbre d'entrée du moteur de lancement.

Les auxiliaires à entrainer par ce réducteur sont:

- Pompe à huile principale de lubrification.
- Pompe à huile hydraulique.
- Pompe à combustible.
- Pompe à huile d'étanchéité… etc.

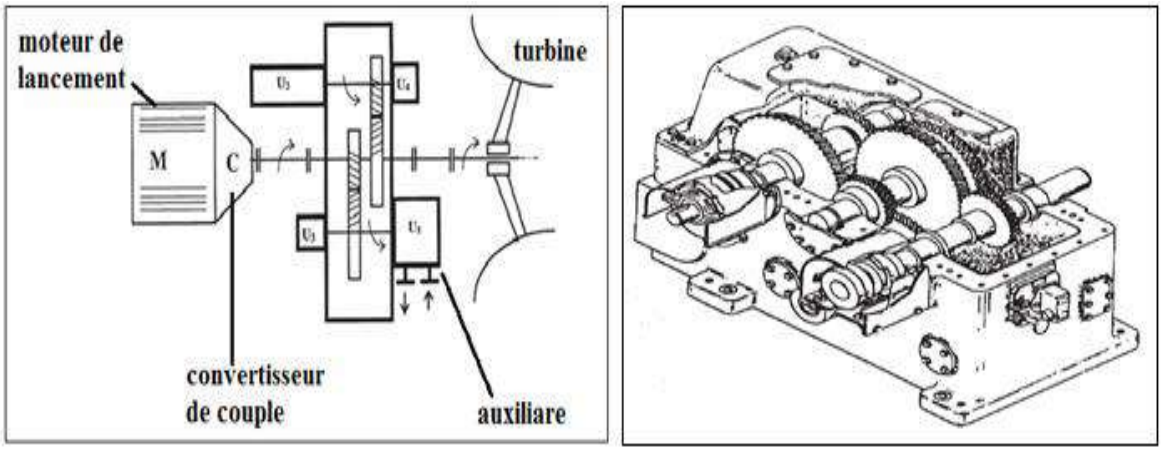


Figure III.36. Schéma explicative du gear box des auxiliaires **[1].**

- **Le réducteur de puissance :**

Il sert à entrainer le compresseur centrifuge 2BCL. Il adapte la vitesse de sortie de la turbine à celle de compresseur. Dont, il permet de réduire la vitesse de sortie de l'arbre de la turbine de **4900** rpm une vitesse à l'entrée du compresseur centrifuge .

Le réducteur est construit avec des arbres creux (quillshafts) qui permettent d'installer des diamètres d'arbre correspondant aux contraintes maximum requises.

h) Les enveloppes de confinement :

La turbine MS5002 C'est équipée de trois types de confinements différents:

1- Enceinte machine fixée sur le bâti.
2- Enveloppe antibruit fixée sur le sol
3- Hangar.

Les enveloppes de confinement servent à :

- Se protéger des agressions extérieures (intempéries, air ambiant pollué …)
- Réduire le bruit ambiant extérieur.
- Confiner les risques incendie.

L'enceinte de confinement de la turbine est équipée de plusieurs systèmes citant :

- Système électrique.
- Système de ventilation.
- Système éclairage.
- Système de lutte incendie.
- Système de détection incendie.

i) Le système de ventilation :

Sa fonction consiste à maintenir une température convenable pour le matériel et le personnel, avant et pendant le démarrage de la turbine.

Pour cela, l'enceinte est sous vide car l'évacuation de ventilation pressurisée sous hangar induit une zone à risque donc une zone classifiée.

Pour se protéger des nuisances externes, la quantité d'air nécessaire est prise en aval du filtre turbine et distribué dans plusieurs bouches d'aération situées sur les endroits à réfrigérer. Les ouvertures d'évacuation et leurs conduits sont désigné santibruit.

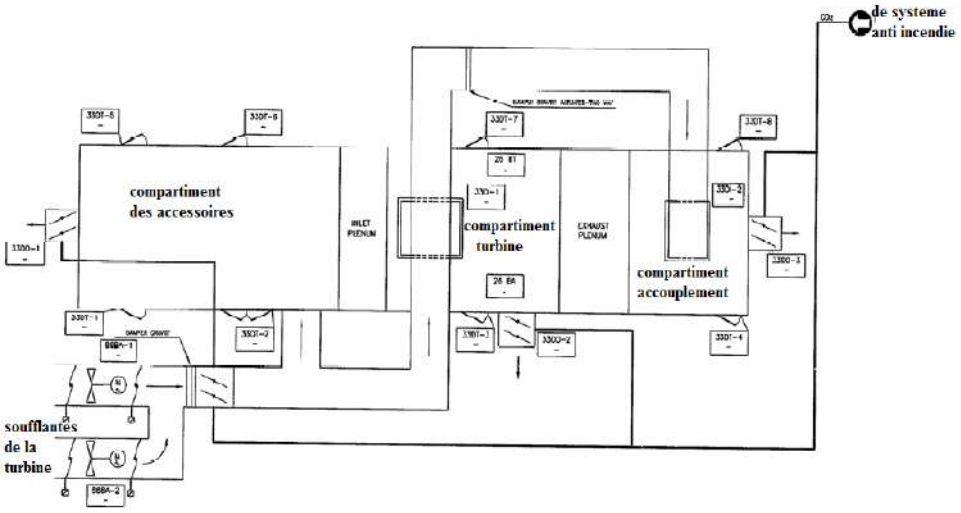


Figure III.37.schéma de système de ventilation **[1].**

j) Le système de refroidissement de l'huile de lubrification :

L'huile est réchauffée par frottement au contact des paliers et par conduction au contact des parties chaudes. Il faut donc constamment la refroidir.

Le procédé de refroidissement de l'huile de la turbine est de type « huile-air » assuré par deux aeros-réfrigérants a air forcé, dont La température de l'huile est régulée par la vanne 3 voies (VTR) du circuit d'huile qui fonctionne selon le principe suivant :

Si la température de l'huile qui vient de la caisse est tolérable, c.-à-d, a l'environ, l'huile passe directement vers les paliers a lubrifiés.

Sinon, si la température de l'huile est élevée, la vanne VTR dirige l'huile vers les aeros- réfrigérant afin de la refroidir avant qu'elle se diffuse vers les endroits à lubrifier.

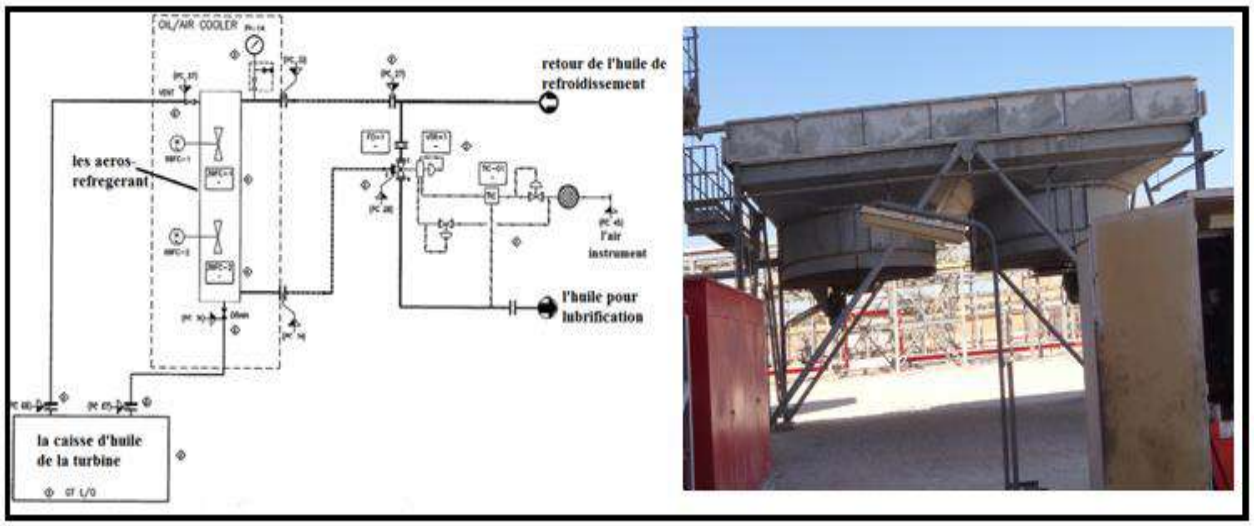


Figure III.38. Les aeros réfrigérants de l'huile de lubrification **[1,5].**

k) Les skidsbâtis d'installation :

Ils servent à supporter les éléments suivants :

- Réservoir d'huile
- Pompes aux aires diverses selon la configuration
- Système de démarrage
- Système de contrôle de combustible et d'arrêt
- Filtres d'huile et de combustible
- Panneau d'instrumentation
- Boîtes de connexion….etc.

De plus le bâti de la turbine comprend les éléments permettant les opérations suivantes :

- Points de remplissage d'huile réservoir
- Points de drainage pour remplacement d'huile
- Passerelles de maintenance et opérations
- Points d'accrochage/supportage pour manutention des bâtis… etc.

l) Système de contrôle :

La turbine MS5002Cdispose d'un système centralisé local (control panel) qui assure le contrôle, la régulation et la protection de la turbine .

Ce système est programmé pour assurer les multiples fonctions qui sont nécessaires à toutes les opérations de la turbine.

Ce système gère une série de paramètres sous forme de signaux entrées/sorties. Ce sont les signaux des transmetteurs de turbine (transmetteurs de pression, températures, position de vannes, détection incendie etc…)

Le panneau de contrôle est séparé en sous-systèmes:

- **Système de contrôle et séquences** :

Assure les fonctions suivantes :

- Contrôle de séquence de démarrage
- Contrôle de vitesse
- Contrôle de température à l'échappement
- **Système de protection** :

Ce système intégré dans le panneau local de contrôle protège la turbine de :

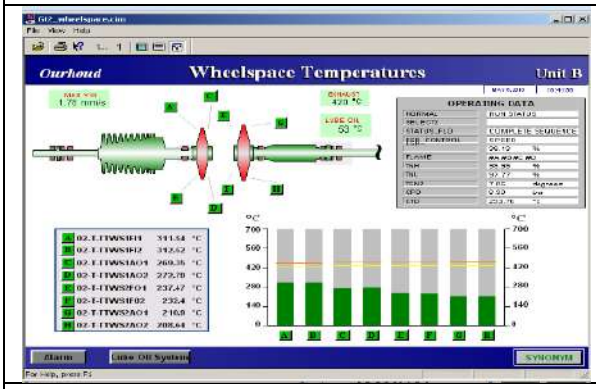
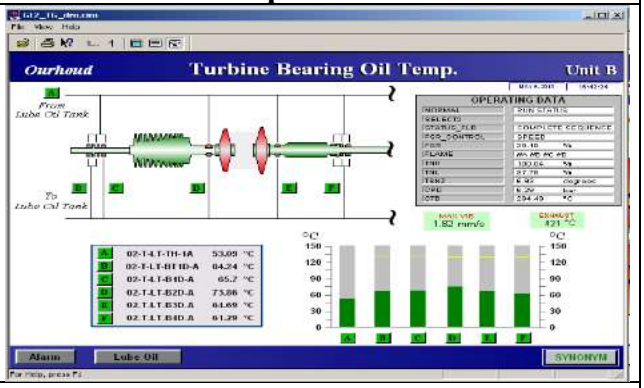
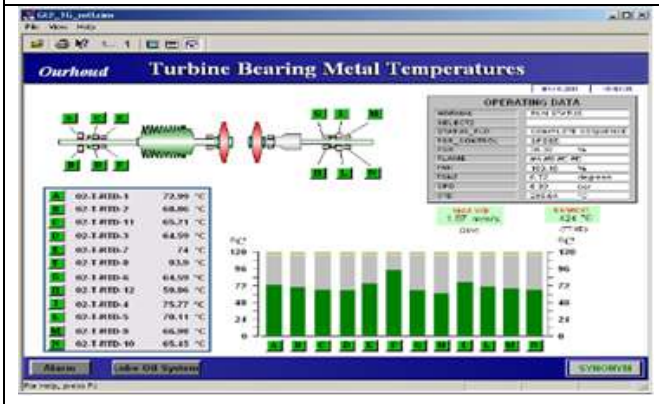
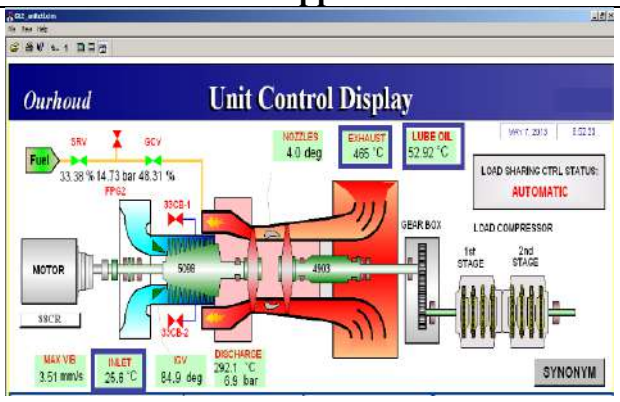
- Survitesse
- Défaut de flamme

- Pression anormales d'huile de lubrification, de contrôle et hydraulique
- Pression anormale d'alimentation et d'injection du combustible
- Protection pour les fonctions liées à la machine entrainée… etc.
- Température shautes :

a) Contrôle des températures des deux roues HP et BP
b) Contrôle de température de l'huile de lubrification au niveau des paliers
c) Contrôle de la température des paliers
d) Contrôle de température de l'air admission, des gaz d'échappement et de l'huile de lubrification au niveau d la caisse d'huile

- Vibrations hautes :

a) Contrôle des vibrations axiales et radiales des deux arbres HP et BP
b) Contrôle des vibrations au niveau des paliers 1 et 4
c) Contrôle des vibrations au niveau des Gears Box

températures des deux roues HP et BP	**température de l'huile de lubrification des paliers**
	
la température des paliers	**température de l'air admission et des gaz d'échappement**
	
vibrations des deux arbres HP et BP	**vibrations au niveau des Gears Box :**

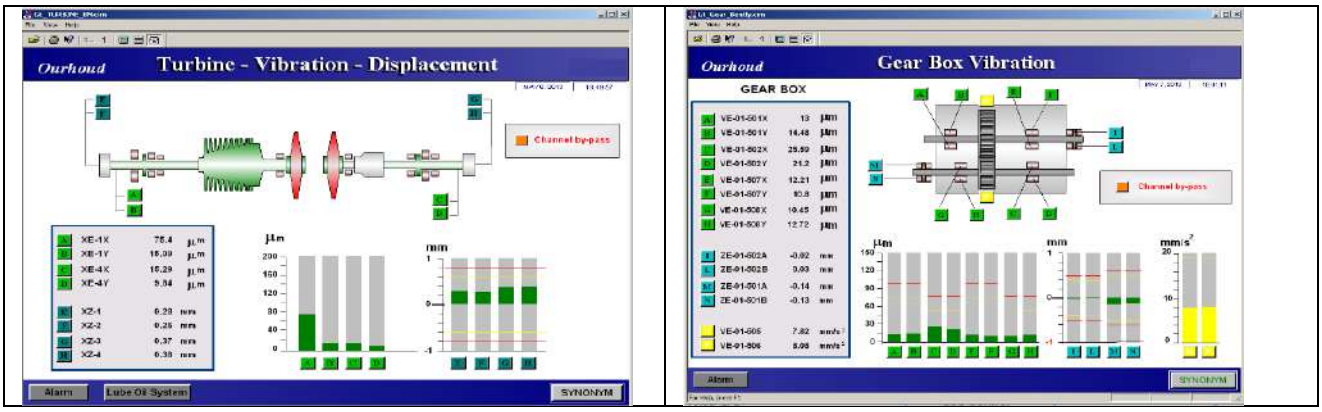


Figure III.39. Ecrans de contrôle des paramètres de fonctionnement **[3]**

7. Séquences de démarrage et d'arrêt de la turbine MS5002C :

Les séquences de démarrage et d'arrêt sont complètement sous le contrôle du contrôleur central de la turbine à gaz. En démarrage, plusieurs accessoires sont mis en marche et puis arrêtés, comme le vireur, le démarreur, les bougies, la pompe auxiliaire de graissage, etc.

7.1.Séquences typiques de démarrage de la turbine :

1) La vérification savante démarrage :

   Les IGVs sont fermés, la vanne de décharge est ouverte, les directrices turbines BP sont ouvertes, la température d'huile de graissage est normale, etc.
2) Embrayage, Roulage de la turbine par le vireur hydraulique.
3) Démarrage et chauffage du moteur de lancement.
4) Apres l'arrivée a une certaine vitesse, 15 tr/min par ex, arrêt du vireur.
5) A partir d'une vitesse de 16%, la ventilation de la turbine commence pour chasser le volume d'air qui existait dans l'espace de l'entrée d'air, la turbine à gaz et les canaux d'échappement. Cet air peut contenir du gaz combustible en fuite et accumulé pendant la période d'arrêt de la turbine, ce qui risque de faire une explosion a la première étincelle d'allumage.
6) Fonctionnement des allumeurs.
7) Injection du combustible et la réalisation des différentes phases d'allumage : formation du noyau de feu dans un tube de flamme, propagation du noyau pour avoir une flamme stable dans le tube de flamme a allumeur, propagation de flamme vers les autres tubes.
8) Phase de réchauffage de la turbine.

On essaie de contrôler le taux d'échauffement des pièces chaudes (tube de flamme, pièce de transition, directrices et aubes turbine) pour éviter un échauffement trop rapide ce qui produit des contraintes thermiques excessives.

9) Désactivation des allumeurs après stabilisation de flamme.
10) La phase d'accélération commence.
11) La turbine devient autonome (N1 ~ 60%). C'est à dire que le bilan de couple sur l'arbre turbine est positif. Le couple moteur de la turbine dépasse le couple résistant compresseur.
12) Le démarreur est débrayé.
13) Le démarreur est désactivé.
14) La turbine atteint la vitesse de pré-régulation.
15) Le régulateur de tension générateur est mis en marche.
16) Disjoncteur du générateur est fermé.

7.2.Séquences typiques d'arrêt de la turbine :

1) La commande d'arrêt est donnée.
2) Le carburant est réduit, la vitesse diminue.
3) Le disjoncteur du générateur déclenché sur inversion de puissance.
4) La turbine décélère.
5) La vanne de décharge du compresseur est désactivée. (à N1 < 90% de la valeur nominale)
6) La vanne des IGVs est désactivée.
7) La turbine décélère au-dessous de la vitesse (Set Point).
8) La commande de déclenchement d'arrêt est donnée.
9) Le solénoïde de la vanne d'arrêt du carburant est désactivé.
10) La vitesse de la turbine se ralentit jusqu'à l'arrêt.
11) Le moteur de la pompe du rochet hydraulique est démarré.
12) Le post-refroidissement de la turbine commence.

1. Les types de maintenance appliqués pour la TAG MS5002 C:

Les équipements et les organes de la turbine se détériorent sous l'action de multiples causes, surcharge en cours de fonctionnement, mauvaise exploitation, action des agents corrosifs, chimique, atmosphérique,… etc. Ces détériorations peuvent être à l'origine des arrêts de fonctionnement (pannes) de la turbine, des perturbations considérables de production, de l'augmentation des coûts de production de façon générale. Pour cela il est indispensable de maitre un plan de maintenance préventive afin de diminuer ces pannes et de minimiser ces couts.

1.1. La maintenance conditionnelle (au cours de fonctionnement de la turbine):

Elle comprend les opérations faites durant le fonctionnement de la turbine. Des données en opération devant-être enregistrées pour permettre d'évaluer les performances de l'équipement, les besoins d'entretien et d'intervention lorsque ces relevés indiquent des alarmes qui vont déclencher la turbine par la suite. Le tableau suivant montre les paramètres importants à contrôler ainsi que leurs modes de contrôle.

Les paramètres	Mode de contrôle			
	I	E	S	P
-Vitesse de rotation de la turbine HP et BP	+			
- Température à l'échappement.	+		+	+
-Température à l'entrée de la turbine	+	+	+	+
- Vibration au niveau des paliers	+	+	+	+
- Risque de pompage	+		+	+
- ΔP filtre à air			+	
- Température sortie du compresseur	+		+	
- Contrôle présence de la flamme			+	+
- Haute température des paliers	+		+	+
- Température d'huile de graissage	+		+	+

I: indication E: enregistrement S: signal d'alarme P: protection

Tableau IV.1. Les paramètres contrôlés et les modes de contrôle.

- **Quelques opérations effectuées de la maintenance conditionnelle:**

a) Appoint d'huile de lubrification.

Le niveau d'huile de lubrification est l'un des paramètres les plus importants à contrôler, dont une baisse de niveau d'huile sous la valeur minimum peut provoquer des dommages très graves pour les organes rotatifs de la turbine qui sont en contact. Lorsque le niveau d'huile rapproche de la

valeur minimum, l'équipe de mécanique se désigne de faire l'appoint d'huile par des futs d'huile de type **TORBA 46**. Le remplissage se fait en utilisant une pompe pneumatique qui aspire des futs et refoule dans la caisse à huile jusqu'à ce que le niveau atteint**75%**.

b) Nettoyage de compresseur d'air :

La veine d'air (et en particulier le compresseur) est alimentée par de l'air pouvant être chargé d'éléments érosifs ou corrosifs. Par exemple, érosion en atmosphère sablonneuse, corrosion en atmosphère saline.

Dans ces conditions, il convient d'effectuer des procédures de traitements ou nettoyage qui consistent à pulvériser un mélange approprié (gamlene mécanique) dans l'entrée d'air lors d'une séquence de fonctionnement. Ce nettoyage est initié après que la pression de sortie d'air du GG ait baissée (environ 5%). La procédure de lavage du compresseur axial est la suivante :

- isolement du fuel gaz (pose d'un joint plein).
- isolement du système anti incendie (salle de contrôle).
- pose des joints plein ou bouchons aux positions suivantes :

1/ piquage 10^{ime} étage partie supérieur et inférieure (bride pleine 6").

2/piquage d'air pour instrumentation.

-démontage des deux bougies d'allumage.

-remplissage des cuves de l'appareille de lavage avec de l'eau chaud (de 70 et 85°C).

-ajouter du solvant dans la petite cuve (25L) de solvant (gamlene mécanique) pour 100L d'eau.

-démarrage du moteur de lancement en crack.

- injecter de la solution pendant 3 à 5 min puis arrêt de moteur de lancement.

-arrêt de l'injection après arrêt total du rotor en gardant la solution agir durant 20min.

-ouverture des vannes de drainage et injection de l'eau jusqu'à obtention d'un drainage plus ou moins clair après un autre démarrage.

- arrêt de l'injection de la machine (moteur de lancement) 2 à 3 min après l'arrêt de l'injection.

-ouverture de la vanne de drainage du caisson d'admission.

-Fermeture des vannes et disposition des circuits.

c) changement des filtres à huile :

Les filtres à huile, de type cartouche métallique doivent être changés en cas de colmatage, lorsque ΔP dépasse le seuil déterminé, ce colmatage est due à la contamination de l'huile de lubrification par les impuretés engendrés par les frottements des pièces en mouvement.

d) Intervention sur les aéros-réfrigérant :

Parfois des vibrations anormales ou des sifflements apparaissent au niveau des aéros réfrigérants

De l'huile de lubrification.

Ces anomalies sont dues à des différentes causes telles que la dégradation des courroies, manque de graissage des paliers, desserrage des vis de fixation des paliers ou désalignement des poulies. L'équipe de mécanique est désignée d'éliminer toute anomalie à travers la procédure suivante :

- Enlèvement de la cage de l'aero-réfrigérants.
- Vérification de l'état de la courroie et contrôle de son étendue par un tensiomètre.
- Démontage de couvercle de palier.
- Vérification de serrage des deux vis de fixation de palier.
- Vérification de la graisse du palier.
- Vérification de serrage des pales de l'aero-réfrigérants.
- Vérification des angles des pales.
- Vérification de l'alignement des deux poulies de l'aero par Laser.
- Remontage de la cage de l'aeros-réfrigérant.



Figure IV.1. Les aeros réfrigérants de l'huile **[5]** .

1.2.La maintenance systématique (les inspections à l'arrêt de la turbine):

Elle nécessite le démontage de la turbine à différents degrés. Ces inspections s'effectuent selon un calendrier qui se base sur les heures de marche (fonctionnement) de la turbine.

On peut citer trois types des inspections appliquées pour la turbine MS5002 C qui sont :

1.2.1 Une inspection du système combustion (combustion inspection CI):

Chaque **8000 h** de fonctionnement, une inspection du système combustion de la turbine réclame un temps d'arrêt relativement court de la turbine à gaz afin de vérifier l'état des éléments suivants :

- Bruleur.
- Chambre de combustion (chemise, chapeau, douille d'écoulement).

- Tubes d'interconnexion.
- Bougies d'allumage.
- Détecteurs de flammes.

Elément	Objet de l'inspection
Chemise de combustion	Corps étrangères Usure anormale
Bruleurs Pièces de transition	Fissure Trou de refroidissement obstrué
Tubes d'interconnexion	Oxydation, corrosion, érosion
Bougies d'allumage	Perte de particules
Détecteurs de flamme	jeu

Tableau IV.2. Les inspections de la CI.

1.2.2 Inspections de la veine des gaz chauds (hot gaz parth inspection HPGI) par NDT (Non Destructif Test) :

Elle s'effectue chaque **16000 h** de fonctionnement. Le but de ce niveau d'inspection est d'examiner les pièces de la turbine les plus soumises aux contraintes par les températures élevées du système des gaz de combustion; cette visite comprend essentiellement :

2 Directrices, tous les étages.

3 Aubes du rotor, tous les étages.

4 Anneaux de protection extérieurs, tous les étages.

Elément	Objet de l'inspection
Système de combustion	Symptômes du tableau précédant
Les deux directrices	Corps étrangères
Les aubes de tous les étages	Usure anormale
Joints labyrinthes	Etat de revêtement
thermocouple de l'espace de la roue	Oxydation/ corrosion/érosion
Carter de l'échappement de la turbine	Traces de température/ perte de métal
Aubes de compresseur axial et les IGV	Déformation / jeu.

Tableau IV.3. Les inspections de la HPGI.

1.2.3 La révision générale de la turbine (major inspection MI) :

C'est une révision générale qui se faite chaque**48000**heures de fonctionnement. Le but d'une révision générale est d'examiner toutes les pièces intérieures du stator et du rotor, de l'admission de la chambre des filtres jusqu'aux systèmes d'échappement.

Elément	Objet de l'inspection
Système de combustion	Symptômes du tableau de CI
Veine des gaz chauds	Symptômes du tableau de HPGI
Les aubes de compresseur	Corps étrangers
Les roues de la turbine	Usure anormale
Zones supportée de l'arbre	Traces de fuites intérieures
Paliers	Oxydation/ corrosion/ érosion
Joints labyrinthes	Perte de métal
Système d'admission	déformation
Système d'échappement	déformation
Autres systèmes auxiliaires	jeu

Tableau IV.4. Les inspections de la MI.

2. Quelques inspections effectuées au niveau du champ Ourhoud pour la turbine MS5002 C :

2.1. Inspection de la chambre de combustion (COMBUSTION INSPECTION CI) :

La CI (combustion inspection) de la turbine 10A a été réaliséen**2006,** par une équipe spécialisée d'ALGESCO accompagnée des agents Sonatrach Ourhoud.

L'effectif pour l'inspection est composé de :

-un (01) superviseur.

-trois (03) mécaniciens.

-un (01) instrumentiste.

-un agent superviseur de SONATRACH OURHOUD service mécanique.

Les taches principale seffectuées durant cette inspection se résume comme suite :

- **Démontage des organes:**

-Vérification de l'isolement entrée du fuel gaz.

-Repérage et marquage de chaque raccord de tube avec le numéro de la chambre de combustion correspondant avant le démontage.

- Démontage des veines de gaz

-Repérage et démontage des buses d'injection pour qu'elles puissent être remontées sur les mêmes couvercles des chambres de combustion pendant le démontage.

- Repérage et démontage des couvercles des chambres de combustion.

-Repérage et démontage des tubes d'interconnections (tubes de propagation de flamme).

-repérage et démontage des chemises de combustion (tubes à flamme) et des pièces de transition.

-Ouverture de la trappe d'admission et d'échappement.

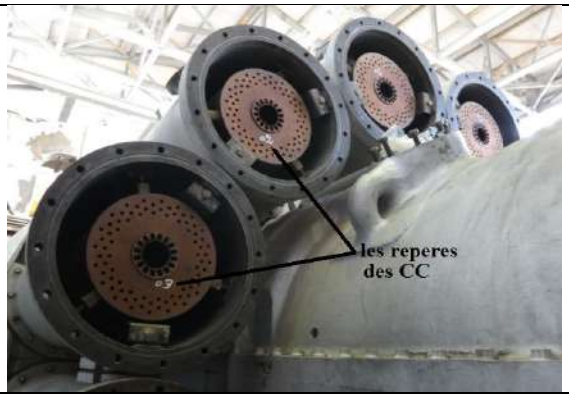
Les conduites de fuel gaz	Les buses d'injection
	
Les couvercles des tubes à flamme	**Les tubes à flame**
	
Les pièces de transition	**Les tubes d'interconnexion et les longuettes**
	

Figure IV.2. Les organes du système de combustion**[5]**.

- **Nettoyage, inspection et contrôle des différents organes :**

1. Les éléments de retenu (longuettes) :

Le contrôle des éléments de retenu des tubes de propagation de flamme pour une éventuelle usure ou un effritement des surfaces de contact.

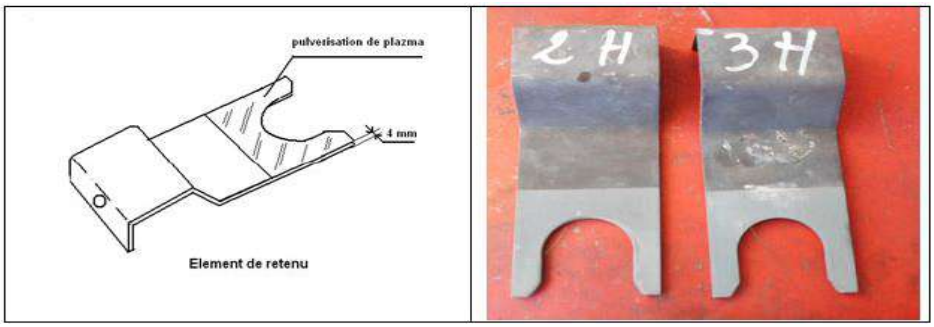


Figure IV.3. Contrôle des longuettes.

2. Les injecteurs de gaz :

Nettoyage des injecteurs pour enlèvement des accumulations importantes de carbone et débouchage des orifices obturés, puis le contrôle visuel des surfaces de contact des buses. Ensuite les buses sont soumises à un contrôle de RESSUAGE afin de détecter la moindre fissure ou arrachement de matière.



Figure IV.4. Contrôle des injecteurs de fuel gaz **[5].**

3. Les tubes de connexion (tubes de propagation) :

Le contrôle des tubes de propagation des flammes a pour butde révéler les fissures de soudures, des brûlures et l'usure.

Le contrôle de RESSUAGE se fait à l'endroit où les anneaux sont soudés avec le tube.



Figure IV.5. Inspection des tubes d'interconnexion **[5].**

4. Les chemises (tube à flamme) :

Le contrôle des chemises a pour but de détecter l'usure des joints élastiques ou lamelles pliées, ou les fissurations sur les manchons de chemises.

Le logement de l'injecteur sur la chemise doit être contrôlé pour évaluer l'usure qui ne doit pas atteindre 50% de l'épaisseur initiale de la bague du logement de l'injecteur qui égale à 2.4mm.

Le contrôle par ressuage en utilisant un agent pénétrant fluorescent est indispensable, les parties concernées par ce type de contrôle sont :

- Butée de chemise.

- Collier tube de propagation de flamme.

- Ensemble couvercle

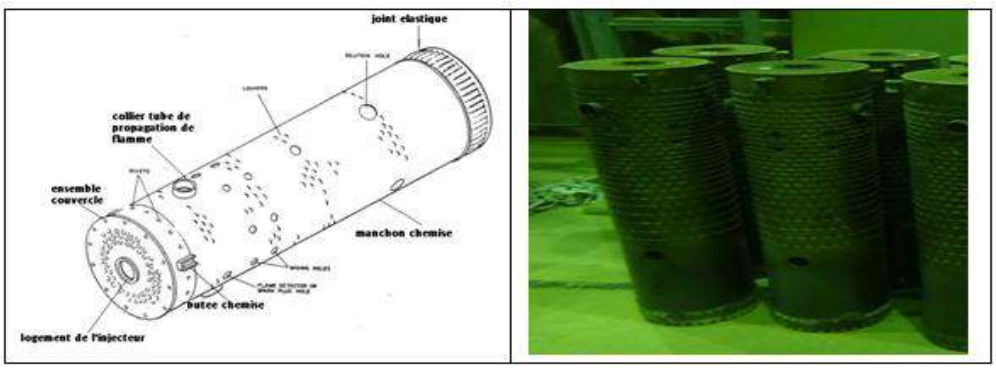


Figure IV.6. Inspection des tubes a flamme **[5]**.

5. Contrôle boroscopique :

Le contrôle BOROSCOPIQUE est réalisé par les agents du service inspection avec la collaboration du superviseur ALGESCO.

Les éléments contrôlés sont :

- Les IGVs du compresseur axial.

-Les éléments de transition.

-La roue BP et les aubes.

-La roue de deuxième étage et les aubes.

REMARQUE : l'inspection par un agent pénétrant (RESSUAGE) des composants des chambres de combustion et assurée par le service inspection CSC en collaboration avec le superviseur d'ALGESCO en présence du superviseur mécanique OO.

-Inspection des joints de dilatation de l'admission et échappement.

-Fermeture des trappes d'admission et échappement.

-Remontage des différents organes de système de combustion.

-Inspection des filtres d'air de système d'admission.

-Inspection des volets d'extracteur d'air de l'admission et d'échappement

-Inspection des galets de la couronne directrice.

-Inspection des joints de retour d'huile des paliers 1-2-3-4.

-Lavage off line du compresseur axial.

2.2.L'inspection de la veine des gaz chauds (HPGI) par NDT:

Description de l'opération :

La NDT (Non Destructif Test), appelé également CND (Control Non Destructif),Cette inspection se fait chaque 16000 heures de fonctionnement et consiste à l'inspection visuelle de toutes les pièces qui rentrent dans la combustion dans la turbine, ainsi que l'inspection par ressuage pour les pièces les plus critiques et l'application des modifications au niveau du diaphragme et les tourillons pour éviter le frottement entre le capillaire du thermocouple et d'autre inspection des autres organes telles que les roues HP et BP, les IGV.

La NDT a été réalisée par une équipe spécialisée d'ALGESCO qui se compose de :

-Un (01) superviseur.

-Trois (03) mécaniciens.

-C/maitre mécanicien

-Un (01) instrumentiste.

-Un ingénieur NDT.

Les travaux supervisés par un agent de SONATRACH OURHOUD service mécanique.

Les taches principales effectuées sur la turbine pendant cette inspection sont:

- Platinage du poste fuel-gaz et CO_2 ;

- Démontage des organes et des accessoires de la chambre de combustion.

- Démontage des éléments suivants :

- Les flexibles de fuel gaz.

- Les injecteurs

- Les languettes

- Les tubes à flamme

- Les tubes interconnexion

- Les pièces de transition

- Les chambres de combustions N° 3, 4, 5, 6 ,7 ,8 ,9 et 10.

- Démontage du demi-casing supérieur wrapper.

- Démontage de la caisse de turbine supérieur.

- Inspection de différentes pièces de système de combustion : Tubes à flamme, les languettes, les tubes interconnexion, les pièces de transition et les injecteurs.

- Inspection des roues HP et BP en utilisant un révélateur et un pénétrant.

- Inspection des IGV.



Figure IV.7. Inspection des IGV **[5].**

- Remontage des différents organes**.**

- **Travaux additionnels effectués par OO:**

  - Inspection des filtres d'air.

  - Changement de damper de la gaine d'entré d'air

  - Inspection des filtre a cartouche et du filtre en Y du fuel gaz.

  - Démontage les couvercles des bouteilles d'azote pour inspection.

  - Ouverture la trappe d'admission d'air pour inspection et nettoyage.

2.3.L'inspection Majeur (Major Inspection MI) de la turbineMS5002 C :

Une inspection majeure MI (Major Inspection) a été effectuée pour la turbine à gaz 5002A en 2015, cette inspection consiste à démonter les différentes pièces de la partie supérieure de la turbine ainsi que les deux rotors et les paliers avec les accessoires (habitacle – gaine de l'air de refroidissement, instruments,…) afin de faire une inspection générale de toutes les pièces avec réparation ou changement de celles qui ont endommagées.

La MI a était réalisé par une équipe du sous-traitant ALGESCO qui se compose de :

- (01) Ingénieur superviseur.
- (01) Ingénieur instrumentiste
- (01) C/maitre mécanique.
- (12) Mécaniciens.
- (03) Instrumentistes.

Les travaux sont supervisés par les agents Sonatrach –OO.

Les taches principales effectuées durant l'inspection MI :

- Démontage des équipements d'instrumentation, de la gaine de l'air de refroidissement du compartiment, des habitacles et des portes, des caches des accouplements du coté auxiliaire et du coté charge, des flexibles de fuel gaz et des injecteurs et des flasques des chambres de combustion.

Porte d'habitacle	Les flasques de chambre de combustion
	
Un cache	**Les flexibles de fuel gaz**
	

Figure IV.8. Démontage des caches et des circuits **[5].**

- Démontage les accouplements coté auxiliaire et coté charge.
- Installation des dispositifs d'alignement et faire une lecture d'alignement primaire :
- Démontage du chapeau d'échappement.
- Démontage du manifold du fuel gags.
- Démontage du manifold et de la ligne de l'air anti-pompage.
- Démontage les tubes à flamme.
- Démontage les tube interconnexion des chambres.
- Démontage la caisse d'admission et les accessoires.
- Démontage les chambres de combustion.
- Démontage de la partie supérieure du compartiment de la caisse d'échappement.
- Démontage de la partie supérieure du rapper des chambres de combustion.

- Démontage de la partie supérieure de la caisse d'admission du compresseur axial.
- Démontage les pièces de transition

La caissed'admission	La caissecompresseur
	
La caisse turbine	**La caisse de décharge**
	

Figure IV.9. Les différentes caisses de la turbine **[5].**

- Démontage de la caisse d'échappement.
- Démontage de la directrice 1èr étage à aubes fixes.
- Démontage des rotors HP et BP.
- enlèvement des couvercles des paliers(les deux paliers lisses et les deux paliers porteurs).
- Nettoyage, inspection et contrôle des bruleurs, les tubes à flamme, les pièces de transition et les directrices 1èr étage des aubes fixes et 2em étage à aubes variables.

Pénétrant sur la directrice à aubes fixes	Fissure sur l'anneau de la directrice
	

Figure IV.10. Inspection NDT de la directrice **[5].**

- Contrôle NDT du rotor HP et BP.
- Contrôle des cotes des paliers lisses 1 et 2.

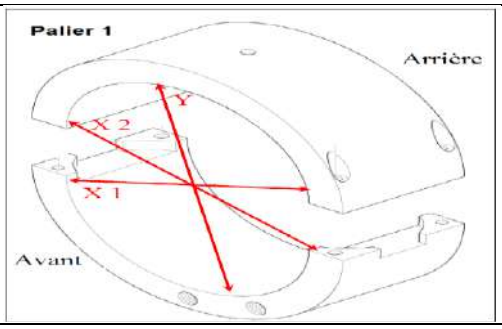
Coussinet du palier lisse	Les distances à contrôler
	

Figure IV.11. Contrôle des cotes des paliers lisses **[5].**

- Contrôle des diamètres des soies des paliers 1 et 2 sur le rotor HP et 3 et 4 sur le rotor BP.

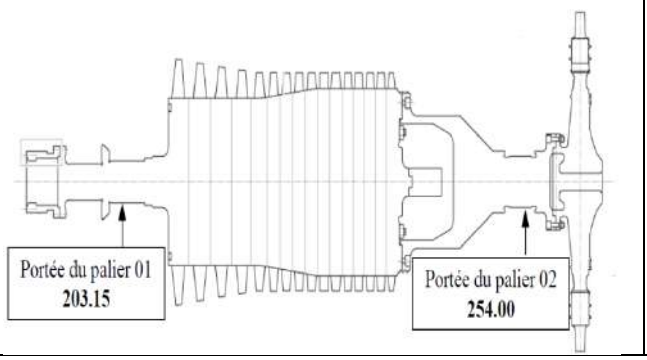
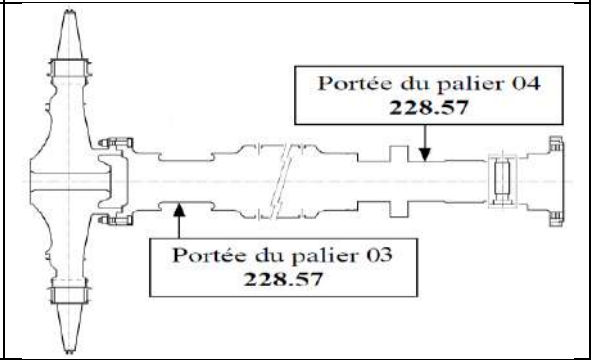
Paliers 1 et 2	Paliers 3 et 4
	

Figure IV.12. Contrôle des soies des paliers.

- Nettoyage et inspection des pièces.
- remontage des différents organes avec prise des jeux et des ajustements nécessaires.

- remontages des différents circuits.
- Appoint d'huile de la caisse de la turbine.

- **Travaux supplémentaires effectués par les agents OO** :

-Changement des filtres d'air « 320 » cartouches.

-Vidange de la caisse d'huile de la turbine 90 futs.

-Nettoyage de la caisse d'huile et remplissage de l'huile.

-Changement des filtres d'huile « A » et « B ».

-Changement des deux filtres d' l'huile hydraulique.

1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons calculer les paramètres thermodynamiques de la turbine à gaz MS 5002C, en se basant sur les conditions d'exploitation sur site. L'objectif principal de ce calcul est de déterminer le degré d'influence des conditions climatiques et plus particulièrement la température de l'air ambiant sur les performances thermodynamiques de la turbine.

2. Cycles thermodynamique de la turbine à gaz :

2.1.Cycle de Brayton [7] :

Le cycle thermodynamique de base décrivant le fonctionnement d'une turbine à gaz est appelé "cycle de Brayton". C'est un cycle thermodynamique ouvert du fait que les gaz d'échappement sont évacués directement vers l'atmosphère sans aucune récupération (cycle non régénéré, non combiné,...). Il se compose essentiellement de quatre transformations qui sont représentées sur les diagrammes **(***P* - *v***)** et (T - *S*) (figure V.1).

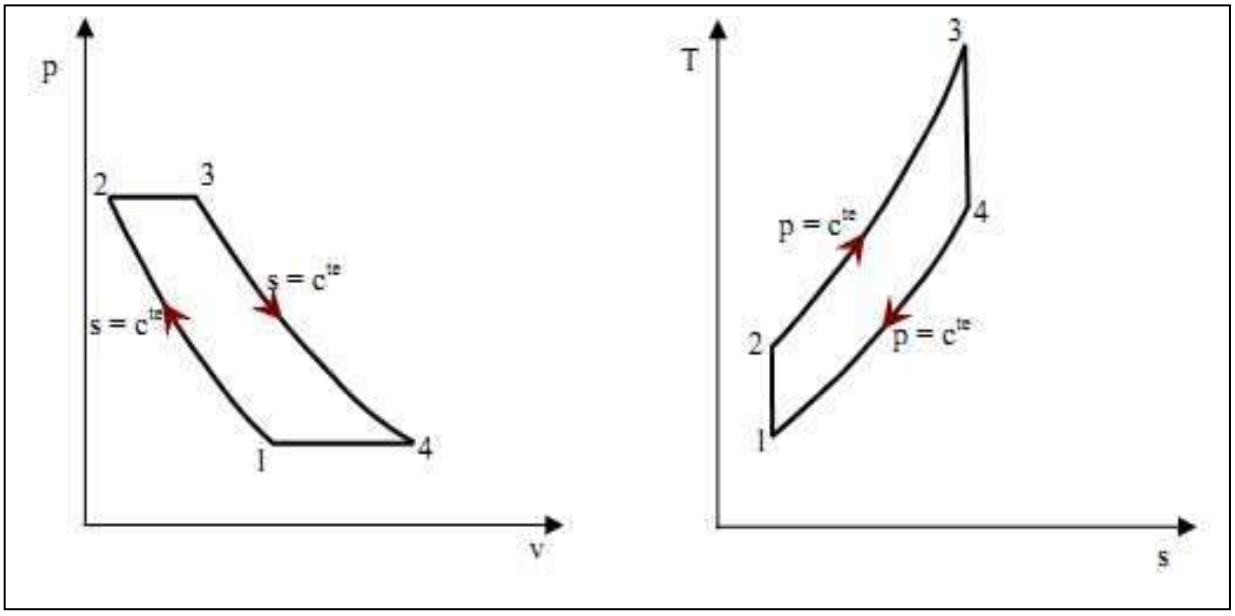


Figure .V.1.Cycle idéal d'une turbine à gaz dans le diagramme (P-V) et (T-S)

Avec :

(1-2) : Compression isentropique ;

(2-3) : Apport de chaleur à pression constante dans la chambre de combustion ;

(3-4) : Détente isentropique;

(4-1) : Echappement dans l'atmosphère.

Chacune de ces évolutions thermodynamiques est caractérisée par une équation mathématique découlant d'un bilan énergétique entre l'entrée et la sortie de chaque compartiment, on a à cet effet :

- **Travail de compression (1-2)**

$$W_C = m_a * (h_2 - h_1) \qquad \text{(V-1)}$$

- **Combustion (2-3)**

La quantité de chaleur reçue par le fluide moteur

$$Qcc = (\dot{m}_a + \dot{m}_c) * h_3 - \dot{m}_a * h_{2S} \qquad \text{(V-2)}$$

- **Travail de détente (3-4)**

$$W_T = (\dot{m}_a + \dot{m}_c) * (h_3 - h_{4S}) \qquad \text{(V-3)}$$

2.2.Cycle réel de la turbine à gaz :

Une turbine à gaz à deux arbres est représentée schématiquement sur la figure V.2.

Les sections détente dans les turbines haute pression (HP) et basse pression (BP) sont représentées sur la (figure V.2).

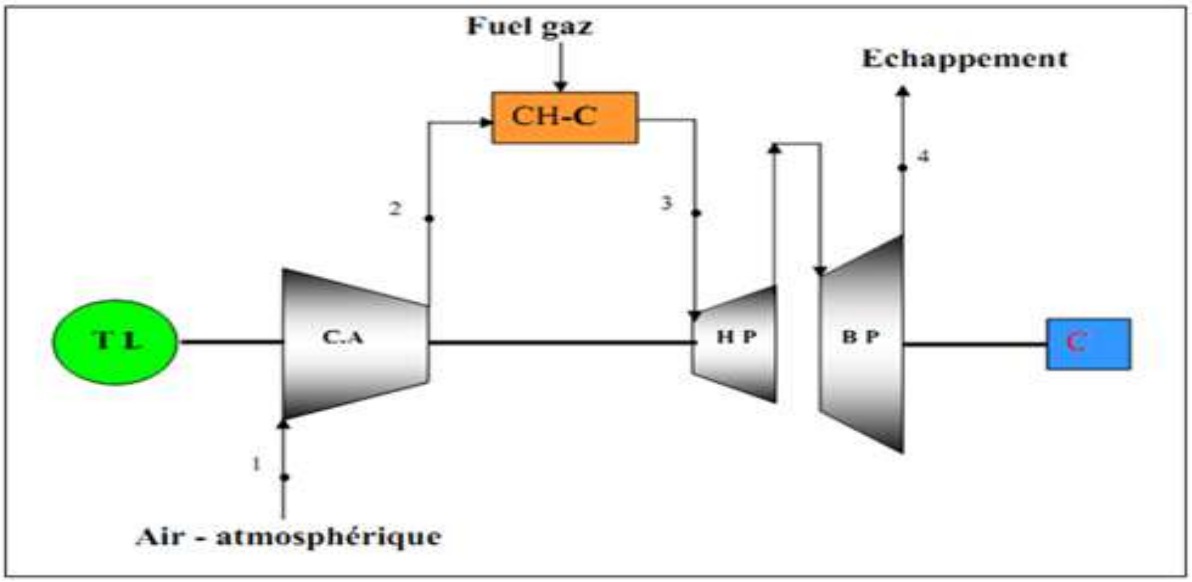


Figure .V.2 Représentation schématique des composantes d'une turbine à gaz bi-arbre

Avec les désignations suivantes:

- C.A : Compresseur axial

- CH-C : Chambre de combustion
- THP : Turbine haute pression
- TBP : Turbine basse pression

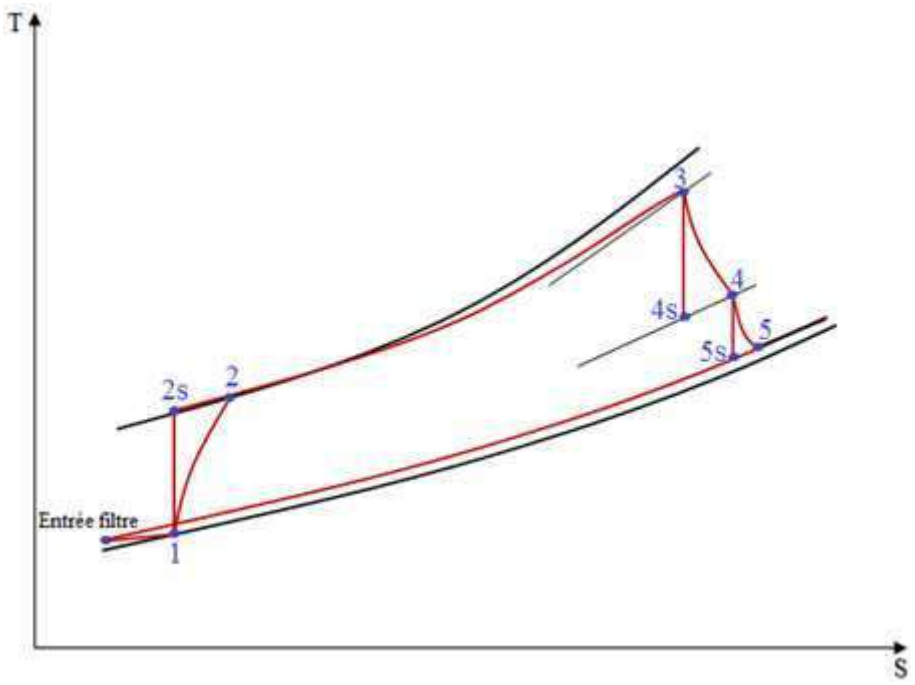


Figure. V.3 Cycle réel d'une turbine à gaz bi-arbre dans le diagramme (T-S)

La figure V.3 illustre une schématisation de l'ensemble des évolutions thermodynamiques d'un cycle réel d'une turbine à gaz bi arbre. Nous allons détailler dans ce qui suit les expressions mathématiques modélisant le processus au niveau de chaque compartiment.

❖ **Etude de la compression (1-2)**

Le rendement isentropique du compresseur est défini comme étant le rapport entre le travail isentropique et le travail réel du compresseur, il s'écrit comme suit :

$$\eta_{IC} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_{2S} - T_1}{T_2 - T_1} \qquad (V.4)$$

Le travail réel spécifique (par unité de masse) du compresseur est donné par [5]:

$$w_c = c_{pam(T_2 - T_1)} \qquad (V.5)$$

La puissance requise par le compresseur, est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$P_C = \dot{m}_a * w_c \qquad (V.6)$$

Dans le cas d'une compression isentropique, le rapport des températures est lié au rapport des pressions par la relation suivante :

$$\frac{T_{2S}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}} \qquad (V.7)$$

Un calcul rigoureux de la partie compression doit, impérativement, tenir compte des chutes de pressions qui peuvent survenir dans la section d'admission. Ces chutes de pression sont, dans la majorité des cas, provoquées par les différents composants constituant le système d'admission à savoir : les filtres, le silencieux, les coudes et l'ensemble de la tuyauterie. Lors du passage de l'air à travers ces composantes, les pertes de charges font diminuer la pression à l'entrée du compresseur. De ce fait, la pression à l'entrée compresseur est donnée par :

$$P_1 = P_{atm} - \Delta P \qquad (V.8)$$

La valeur des pertes de charges sont, dans la plu part des situations, basées sur des estimations pratiques, dans notre le cas cette valeur est estimée à [4]:

ΔP = 101 mmH_2O = 0,0101 Bar

En combinant les équations (V.4) et (V.6) en aboutit:

$$T_2 = T_{amb} * \left[1 + \frac{\left(\varepsilon_C^{\left(\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}\right)}\right)}{\eta_{IC}}\right] \qquad (V.9)$$

Avec : $\varepsilon_c = \frac{P_2}{P_1}$ taux de compression qui représente le rapport entre la pression de sortie et du celle d'entrée du compresseur.

- **Etude dans la chambre de combustion (2-3)**

A la sortie du compresseur, l'air porté à une pression suffisamment élevée pénètre dans la chambre de combustion qui se mélange avec du combustible pour donner lieu à une réaction chimique de combustion. La quantité de chaleur fournie au fluide est donnée par l'équation du bilan suivante :

$$Q_{CC} = (\dot{m}_a+\dot{m}_g)*h_3-\dot{m}_a*h_2 = (\dot{m}_a+\dot{m}_g)*c_{pg3}*T_3- \dot{m}_a*c_{pa2} *T_2 \qquad (V.10)$$

Le rendement de la chambre de combustion est défini comme étant le rapport entre l'augmentation de l'enthalpie des gaz sur la quantité de chaleur fournie par le combustible, son expression est de la forme :

$$\eta_{cc} = \frac{Q_{CC}}{\dot{m}_C*PCI} \text{ D'où}$$

$$\eta_{cc} = \frac{(\dot{m}a+\dot{m}g)*cpg3*T3- \dot{m}a*cpa2 *T2}{\dot{m}_C*PCI} \qquad (V.11)$$

En portant quelques arrangements sur l'équation (V.11), l'expression du débit massique de combustible s'écrit:

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}_a*(cpg3*T3-cpa2 *T2)}{\eta_{cc}*PCI-cpg3*T3} \qquad (V.12)$$

Les pertes de charges dans la chambre de combustion sont estimés à 4% de la pression entrée chambre de combustion [6].

$$P_3= P_2*0,96 \qquad (V.13)$$

❖ **Analyse de la détente (3-4)**

Les gaz chauds à la sortie de la chambre de combustion sont à une pression et température élevées, une partie de cette énergie est convertie en travail mécanique dans la turbine haute pression (THP). Le rendement isentropique de la turbine haute pression est donné par :

$$\eta_{iTHP} = \frac{h_3-h_4}{h_3-h_{4S}} = \frac{T_3-T_4}{T_3-T_{4s}} \qquad (V.14)$$

$$\frac{T_{4S}}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{\gamma_g-1}{\gamma_g}} \qquad (V.15)$$

L'énergie récupérée au niveau de la roue de la turbine haute pression sert essentiellement à entrainer le compresseur moyennant une liaison mécanique. De ce fait, l'énergie mécanique produite par la turbine est transmise intégralement au compresseur à quelques, cela se traduit mathématiquement par :

$$\dot{m}_a * w_c * \frac{1}{\eta_c} = (\dot{m}_g + \dot{m}_a) * w_{THP} \qquad (V.16)$$

Avec η_{mc}: Le rendement mécanique de turbine-compresseur

Posons$f = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_a}$, l'équation (IV.16) peut se mettre sous la forme suivante :

$$w_c = (1 + f) * w_{THP} * \eta_c \qquad (V.16)$$

Avec $$w_{THP} = c_{pg3} * T3 * \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_{THP}^{\left(\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}\right)}}\right) \qquad (V.17)$$

Et $\varepsilon_{THP} = \frac{P_3}{P_4}$ Taux de détente de la turbine HP

A partir de l'équation (V.16) et (V.17) on peut écrire:

$$\varepsilon_{THP} = \left(\frac{(1+f)*\eta_c*c_{pg3}*T3*\eta_{iTHP}}{(1+f)*\eta_c*c_{pg3}*T3*\eta_{iTHP} - w_c}\right)^{\left(\frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}\right)} \qquad (V.18)$$

En combinant les équations (IV.13) et (IV.15) et (IV.18) on trouve l'expression de:

$$T_4 = T_3 * \left(1 - \eta_{iTHP} * \left(1 - \frac{(1+f)*\eta_c*c_{pg3}*T3*\eta_{iTHP} - w_c}{(1+f)*\eta_c*c_{pg3}*T3*\eta_{iTHP}}\right)\right)$$

Après simplification on aboutit à la formule suivante:

$$T_4 = T_3 - \eta_{iTHP} * \frac{w_c}{\beta} \qquad (V.19)$$

Avec $\beta = (1 + f) * \eta_c * c_{pg3} * \eta_{iTHP}$

- **Analyse de la détente (4-5)**

Le rendement isentropique de la turbine basse pression est donné par :

$$\eta_{iTBP} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5S}} = \frac{T_4 - T_5}{T_4 - T_{5s}}$$

$$\text{Avec } \frac{T_{5s}}{T_4} = \left(\frac{P_5}{P_4}\right)^{\frac{\gamma g-1}{\gamma g}}$$

Des deux relations (V.20) et (V.21) on tire l'expression de T_4 :

$$T_4 = \frac{T_5}{1-\eta_{iTBP}*\left(1-\frac{1}{\varepsilon_{TBP}^{\left(\frac{\gamma g-1}{\gamma g}\right)}}\right)} \qquad \text{(V.22)}$$

Avec $\varepsilon_{TBP} = \frac{P_4}{P_5}$ taux de détente de la turbine BP et en tenant compte de la surpression à l'échappement: $P_5 = P_{atm}+\Delta P$

En combinant les relations (V.19) et (V.22) on tire l'expression de T_3en fonction de T_5:

$$T_3 = \left[\frac{T_5}{1-\eta_{iTBP}*\left(1-\frac{1}{\varepsilon_{TBP}^{\left(\frac{\gamma g-1}{\gamma g}\right)}}\right)} + \eta_{iTHP} * \frac{w_c}{\beta}\right] \qquad \text{(V.23)}$$

- **Puissances**

Les différentes puissances mise en œuvre à travers un cycle d'une turbine à gaz sont définies comme suit:

- Puissance du compresseur: $P_C = \dot{m}_a * C_{pam} * (T_2-T_1) * \eta_c$

- Puissance de la turbine haute pression : $P_{THP} = \frac{P_c}{\eta_c}$

- Puissance de la turbine basse pression: $P_{TBP} = (\dot{m}_a+\dot{m}_c) * C_{pgm} * (T_4-T_5) * \eta_T$

- Puissance de la turbine: $P_T = P_{THP} + P_{TBP} = (\dot{m}_a+\dot{m}_c) * C_{pgm} * (T_3-T_5) * \eta_T$

- Puissance utile: $P_u = P_T - P_C = P_{TBP}$

- La quantité de chaleur apportée au cycle : $Q_{cc} = (\dot{m}_a + \dot{m}_c) c_{pg3} * T_3 - \dot{m}_a * c_{pa2} * T_2$

❖ **Le rendement interne de la machine**

$$\eta_i = \frac{Pu}{Q_{cc}}$$

❖ **Le rendement effectif de la machine [8]**

$$\eta_{eff} = \eta_i * \eta_m * \eta_{cc}$$

$\eta_{cc} = 0{,}95$: Rendement de la chambre de combustion

$\eta_m = 0{,}95$: Rendement mécanique de l'installation qui tient compte des pertes mécaniques de la turbine, du compresseur et des mécanismes auxiliaires

❖ **La consommation spécifique [8]**

$$C_s = \frac{\dot{m}_c * 3600}{P_{eff}} = \frac{3600}{PCI * \eta_{eff}} \frac{kg}{kwh}$$

❖ La **consommation de chaleur spécifique (heat rate)**

La consommation spécifiqueest l'inverse du rendement, parce qu'elle indique le rapport entre l'énergie thermique, résultant du processus de combustion, et l'énergie mécanique obtenue sur l'arbre de puissance (ou aux bornes du générateur, si nous considérons les performances d'un réducteur de charge et d'un générateur).

Pour récapituler, et si on appelle Q_{cc} l'énergie résultant de la combustion et N_u le travail utile extérieur, la consommation spécifique **(HR)** est définie comme **[9]** :

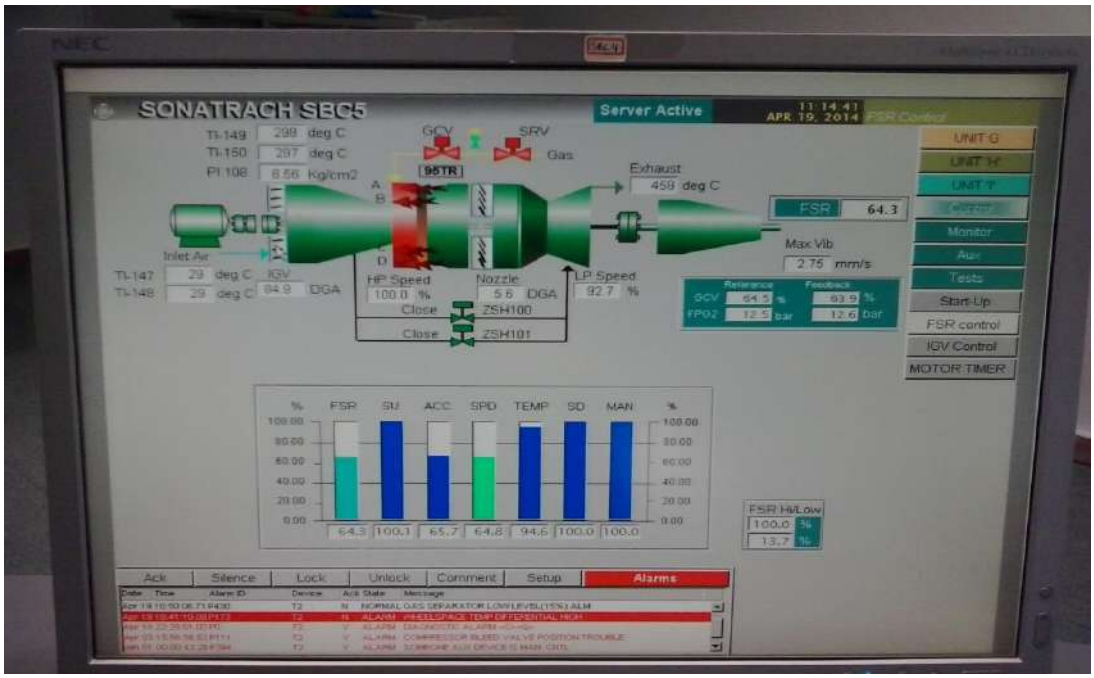
$$\boldsymbol{HR = \frac{Q_{cc}}{N_u} * 3600 \frac{s}{h} = \frac{3600}{\eta_{eff}}}$$

Elle est généralement exprimée en **kJ/kWh.**

3. Calcul thermodynamique

Dans ce qui suit, nous présentons un calcul thermodynamique d'un cycle de la turbine à gaz MS 5002C pour déterminer l'influence des différentes conditions internes et externes sur ces performances. Les calculs seront faits en considérant les

conditions opératoires réelles du site:



Le tableau suivant présente les valeurs affichées sur l'écran de la salle de contrôle qui concerne la turbine MS5002C

Température T1 (K)	Température T2 (K)	Température T5 ((K)	Vitesse GGB	Vitesse BP	Pression P2 (bar)
302.15	570,65	731,15	5100	4607, 19	6.56

Tableau .**V**.1 **valeurs affichées sur l'écran de MARK VI [3]**

- **Le travail spécifique de compresseur**

Calculons d'abord la pression de l'air à l'entrée de compresseur

$$p_1 = p_0 - \Delta P$$

$$p_0 = p_{atm} * \left[1 - \frac{0{,}0065 * Z}{302{,}15}\right]^{5{,}31}$$

ΔP = 167 mmH_2O = 0,0167 Bar (cette mesure est affichée sur MARK VI, utilisée pour contrôler le bon fonctionnement des filtres à l'entrée de système d'admission).

Donc P_1= 0,9288-0.0167= 0.9089 bar

P_1= 0, 9121 bar

Le taux de compression réel est égal à :

$$\varepsilon_c = \frac{6{,}56}{0{,}9089} = 7{,}19$$

$$\boxed{\varepsilon_c = 7{,}19}$$

La chaleur spécifique moyenne de l'air entre T_1 et T_2 est estimée (4

C_{pam} (T_1-T_2)≈ 1,077 KJ/KG*K

$$\gamma_{am} = \frac{\text{Cpam}}{\text{Cpam} - r} = \frac{1{,}077}{1{,}077 - 0{,}287}$$

$$\boxed{\gamma_{am} = 1{,}363 \frac{Kj}{KG * K}}$$

$$T_{2s} = 302{,}15 * (7{,}22)^{0{,}266}$$

$$\boxed{T_{2s} = 510{,}6\ K}$$

$$\eta_{ic} = \frac{511{,}2 - 302{,}15}{570{,}65 - 302{,}15}$$

$$\boxed{\eta_{ic} = 0{,}78}$$

Le travail fourni par le compresseur pour un kilogramme d'air est:

$$w_c = 1{,}077 * (570{,}65 - 302{,}15)$$

$$\boxed{w_c = 289{,}17 \frac{Kj}{Kg}}$$

Chambre de combustion

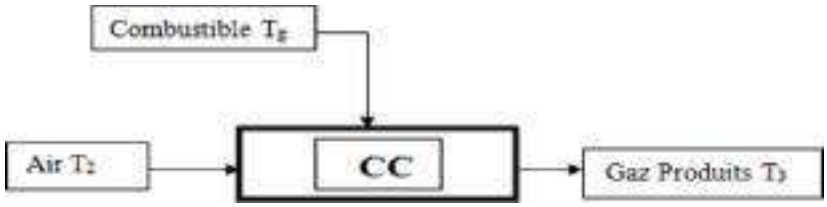


Figure .V.4 Bilan énergétique de la chambre de combustion.

Le tableau suivant donne la composition du gaz naturel qui est utilisé dans la turbine étudié, ainsi la masse molaire et le pouvoir calorifique supérieur total, ces données sont des valeurs moyennes relevées des analyses journalières pendant le mois de mars 2014:

Constituants du combustible	Pourcentage molaire en %
Azote N_2	5,13
Dioxyde de carbone CO_2	0,23
Méthane CH4	83,93
Ethane C_2H_6	7,61
Propane C_3H_8	2,14
i-butane i-C_4H_{10}	0,26
n-butane n-C_4H_{10}	0,46
i-pentane i-C_5H_{12}	0,09
n-Pentane n-C_5H_{12}	0,10
hexane C_6H_{14}	0.05
Propriétés du combustible	
Le pouvoir calorifique supérieur	PCS=9430 kcal/m^3
Le poids moléculaire du combustible	y_c=18,83kg/kmol
Masse molaire de l'air	y_a=28.97 kg/kmol
Le débit moyenne de combustible	$\dot{m}_c$= 161168 Nm^3/J
La pression moyenne de gaz	P_g= 22,05 bar
La température moyenne de gaz	T_g= 27,64 C°
La densité de gaz	d= 0,652

Tableau .IV.2 la composition du gaz naturel

❖ **Détermination de pouvoir calorifique de combustible**

La combustion d'une mole de ce gaz est réalisée selon la réaction suivante:

$0{,}0023CO_2 + 0{,}0513N_2 + 0{,}8393\ CH_4 + 0{,}0716\ C_2H_6 + 0{,}0214\ C_3H_8 + 0{,}0072\ C_4H_{10} + 0{,}0019\ C_5H_{12} + 0{,}0005C_6H_{14} + 2{,}1187\ (O_2 + 3{,}76\ N_2) \longrightarrow 2{,}0434\ H_2O + 1{,}0993\ CO_2 + 8{,}017\ N_2.$

PCS = PCI + Chaleur latente d'évaporation

$$\text{PCI} = \text{PCS} - m_{H_2O} * \frac{\text{L}_{\text{vH2O}}}{\text{V}_\text{g}}$$

Avec : $m_{H_2O} = n_{H_2O} * M_{H_2O} = 2{,}0434 * 18 = 36{,}78$ Kg/mol de gaz

L_{VH2O} = 2501 Kj/Kg = 597,35 Kcal/Kg

$$\text{V}_\text{g} = \frac{8{,}314 * 273{,}15}{101325} = 0{,}0224 \frac{m^3}{mol\ de\ gaz}$$

$$\text{PCI} = 9430 - 36{,}78 * 10^{-3} * \frac{597{,}35}{0{,}0224}$$

$$\text{PCI} = 8449{,}17 \frac{Kcal}{Nm^3}$$

Sachant que dans notre cas les paramètres d'état de gaz sont :

P_2= 7 bar (supérieur à la pression de l'air à la sortie de compresseur) ,

T_2 = 27,64 + 273,15=300,79 k

$$\begin{cases} p_1 = \rho_1 * r * T_1 \\ p_2 = \rho_2 * r * T_2 \\ \rho_1 = \dfrac{p_1}{r * T_1} = \dfrac{101325 * 18{,}83}{8{,}314 * 10^3 * 273{,}15} = 0{,}840\ \dfrac{Kg}{m^3} \end{cases}$$

$$\rho_2 = \rho_1 * \frac{p_2}{p_1} * \frac{T_1}{T_2}$$

$$\rho_2 = 0{,}840 * \frac{7}{1{,}01325} * \frac{273{,}15}{300{,}79} \qquad \boxed{\rho_2 = 5{,}269\ \frac{Kg}{m^3}}$$

$$\text{PCI} = \frac{8449{,}17}{\rho_1} = \frac{8449{,}17 * 4{,}1868}{0{,}840} \qquad \boxed{\text{PCI} = 42113{,}07\ \frac{Kj}{Kg}}$$

❖ **Le débit fuel gaz actuel**

$$\dot{m}_c = \frac{161168}{24 * 3600} = 1{,}865 \frac{\boldsymbol{Nm^3}}{\boldsymbol{s}}$$

Le normal mètre cube est la quantité de Gaz, exempt de vapeur d'eau, qui, à une température de zéro (0) degré Celsius et sous une pression absolue de 1,01325 bar, occupe un volume de un (1) mètre cube.

Le volume réel de gaz qui correspond à un mètre cube normal avec les paramètres cités ci-dessus sera déduit de la formule suivante :

$$V_2 = V_1 \frac{P_1}{P_2} * \frac{T_2}{T_1} = 1 * \frac{1{,}01325}{7} * \frac{300{,}79}{273{,}15} = \ 0{,}159\ m^3$$

Donc $\dot{m}_c = 1{,}865 * V_2 * \rho_2 = 1{,}865 * 0{,}159 * 5{,}269$

$$\boxed{\dot{m}_c = 1{,}56\ \frac{Kg}{s}}$$

❖ **Calcul de débit d'air actuel:**

On rappelle que le débit volumique d'air absorbé par le compresseur axial reste constant, et que le débit d'air massique qui change vu la variation de la masse volumique en fonction de la température d'après la relation suivante:

$$q_v = \frac{\dot{m}_a(15C°)}{\rho_a(15C°)} = \frac{\dot{m}_a(29C°)}{\rho_a(29C°)} = \frac{123}{1{,}2256} = 100{,}36 \frac{m^3}{s}$$

$$\rho_a(29C°) = \rho_a(15C°) * \frac{273{,}15}{302{,}15} = 1{,}1079 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\dot{m}_a(29C°) = q_v * \rho_a(29C°) = 100{,}36 * 1{,}1079$$

$$\boxed{\dot{m}_a(29C°) = 111{,}18 \frac{Kg}{s}}$$

Pour simplifier les calculs on considère la chaleur spécifique du gaz est égale à celle de l'air:

D'après [4] : $C_{pg3} \approx 1{,}18 \frac{KJ}{Kg*K}$ et $\gamma_g \approx 1{,}32$

D'après la formule (IV.23) et admettant les données du constructeur pour le rendement mécanique de la transmission : compresseur-turbine : $\eta_c = 0{,}95$ ainsi que le rendement isentropique de la turbine haute pression $\eta_{iTHP} = \eta_{iTBP} = 0{,}80$ on peut déterminer le taux de détente de la turbine basse pression:

$$\varepsilon_{TBP} = 3{,}98$$

$$\boxed{\varepsilon_{TBP} = 3{,}98}$$

D'où on peut déterminer facilement T_3 à partir de la valeur mesurée T_5 selon la formule (V.23):

$$T_3 = \left[\frac{731{,}15}{1 - 0{,}80 * \left(1 - \frac{1}{(3{,}98)^{\left(\frac{1{,}336-1}{1{,}336}\right)}} \right)} + 0{,}80 * \frac{289{,}17}{0{,}938} \right]$$

$$\beta = \left(1 + \frac{1{,}56}{111{,}18}\right) * 0{,}98 * 1{,}18 * 0{,}80 = 0{,}938$$

$$\boxed{T_3 = 1204{,}75\ K}$$

Enfin on détermine la température T4 selon la formule (V.19):

$$T_4 = 1204{,}75 - 0{,}80 * \frac{289{,}17}{0{,}928}$$

$$\boxed{T_4 = 955{,}47\ K}$$

❖ Calcul des puissances

- La puissance de compresseur : $P_c = 29956{,}9\ kw$
- La puissance de la turbine haute pression : $P_{THP} = 31533{,}58\ kw$

- La puissance de turbine basse pression : P_{TBP} =26692,16 kw
- La puissance utile : $P_u = 26692{,}16kw$
- La chaleur apportée dans la chambre de combustion: $Q_{cc} = 89710{,}437\ kw$

❖ **Le rendement interne de la machine**

$$\boxed{\eta_i = 29{,}87}$$

❖ **Le rendement effectif de la machine**

$$\boxed{\eta_{eff} = 26{,}95}$$

❖ **La consommation spécifique**

$$\boxed{\boldsymbol{C_s} = 0{,}317\,\frac{Kg}{Kwh}}$$

❖ **La consommation de chaleur spécifique**

$$\boldsymbol{HR} = 13358{,}07\,\frac{kj}{kwh}$$

Les résultats concernant les performances principales de la turbine obtenue par le calcul basé sur les conditions réelles dusite avec celles du constructeur sont représentés dans le tableau suivant:

Résultats / **Cas**	**T_1 (K)**	**P_1 (bar)**	η_{eff} (%)	**P_2 (bar)**	**P_{utile} (MW)**	Vitesse **HP** (tr/mn)	Vitesse **BP** (tr/mn)	**C_s** ($\frac{kg}{kwh}$)	HR ($\frac{kj}{kwh}$)
Constructeur	288,15	1,0132	28,8	8.96	28,340	5100	4670	0,277	12500
Réel	302,15	0,9255	26,95	6.56	26.692	5088	4442	0,317	13358

Tableau .IV.3.comparatif des performances de la turbine à gaz sous différentes conditions

Conclusion :

La grande puissance, le bon fonctionnement ainsi que les hautes performances des turbines à gaz 5002C font d'elle un des moyens les plus sollicités pour l'entraînement des charges mécaniques aux centres industriels pétroliers.

Ce travail permet d'apprécier la nécessité d'utilisation des turbines à gaz 5002 dans le domaine de production du pétrole. Ces machines connaissent un développement remarquable justifié à juste titre par leur fiabilité et simplicité d'exploitation.

Le fonctionnement de la turbine à gaz MS5002C doit être connu à partir des déférents organes et systèmes qui la constituent, surtout les systèmes d'huile, système de l'air de refroidissement et d'étanchéité, système du gaz combustible, et les systèmes de protection et de sécurité.

Ce présent travail permet aussi de connaître les caractéristiques et la structure de la turbine à gaz, de bien comprendre son fonctionnement et son utilité dans le domaine pétrolier. Ainsi, le bon fonctionnement de la turbine dépend du programme de maintenance préventive dans le but est de maintenir les équipements en bon état de marche, détecter les problèmes existants, diagnostiquer la nature et la gravité des pannes mécaniques qui surviennent et rechercher les solutions adéquates à ces problèmes.

Bibliographie

[1] : Document de l'entreprise.

[2]: "Turbine à vapeur et à gaz". - Lucien Vivier- Edition Albin Michel (1965).

[3]: sale de contrôle .

[4]: DATASHEET constructeur de GE.

[5]: Rapport ALGISkO ,2012.

[6]: Abdallah BOUAM, 2008 "Amélioration des performances des turbines à gaz utilisées dans l'industrie des hydrocarbures pars l'injection de vapeurs d'eau", thèse doctorale.

[7]: GE Oïl & Gaz "Manuel de formation pour la conduite et l'entretien", AFFAIRE N.P: SONATRACH SRGA2, LOCALITE : ALGERIR.

[8]:" Manuel de maintenance ".-François Moncly- Edition Masson (1996).

[9]: H. Chen ,G.F.C . Rogers, H.I.H. Saravanamuttoo, 1987, "GAS TURBINE THEORRY ", 3ème Edition.