



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



Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU

FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION

Département génie mécanique

SPECIALITE : MAINTENANCE INDUSTRIELLE

OPTION : ÉLECTROMÉCANIQUE

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Thème:

**ELABORATION D'UN PLAN DE
MAINTENANCE POUR LA
CENTRALE ELECTRIQUE D'EL
HAMMA ALGER PAR LA
METHODE AMDEC.**

Les membres de jury:

SLIMANI MOHAND

CHERABI BILAL

YAMANI NOUREDINE

President

Examineur MC/B

Promoteur MC/B

Présenté par :

HADDADOU MESSIFA

MEKERRI THANINA

Promotion : 2021/2022

Remerciements

Nous tenons à remercier infiniment notre promoteur monsieur Yamani Nouredine pour sa patience, sa disponibilité et sa rigueur d'esprit qu'il nous a transmise tout au long de ce mémoire dont il a assuré sur un suivi permanent.

Nos remerciements s'adressent aussi à Mr Hammoum, et Mr Oubraham Pour leur aide durant notre stage à la centrale électrique el HAMMA.

Nous remerciant également le directeur de la société SPE de nous avoir accueillis au sein de son organisme.

Nous exprimons toute notre gratitude aux différents membres de jury Mr Slimani et Mr cherabi pour avoir accepté de juger ce travail.

Une pensée pleine de reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation pendant toute la durée de nos études, pour nous permettre d'acquérir ce modeste savoir.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents, mon papa MOULOUD et surtout ma mère BAYA, qui m'a toujours encouragée par sa présence et son amour.

A mon frère DJAMEL et mes sœurs d'amour KAMELIA, YASMINE, MANEL. Je vous offre ce travail pour vous remercier pour tout.

A mon futur époux KARIM, qui est mon bras droit, que je remercie infiniment.

A mes nièces adorables ALYCIA et ANELLA.

A la mémoire de ma grande mère ALDJIA.

A mes beaux parents à qui je tiens beaucoup.

A mes beaux frères et belle sœur ANIA.

A mes chères amies Djamila, Ahlem, Melissa, Fairouz.

A mon binôme Thanina.

A toute ma promotion 2021/2022.

MESSIFA

Dédicaces

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie
mon travail*

A ma mère,

« Tu m'a donnée la vie, la tendresse et le courage pour réussir.

Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'Amour que je te porte ».

A mon père,

*« L'épaule solide, la personne la plus digne de mon estime et de mon
respect ».*

A mes frères : Mouhemed, Ferhat, Koussaila et Aziouaz

A ma sœur : Thiziri

Au plus petit membre de la famille qui a introduit la joie de mon cœur : Amir

A mes chères cousines : Khadidja et Hanane

A mon binôme : Messifa

A ma famille et toutes les personnes que j'aime.

Thanina

Résumé

Les entreprises doivent maintenir l'outil de production en bon état, et réduire, à la fois, la fréquence et la durée des interruptions accidentelles. Pour cela, on a consacré notre travail à l'amélioration et l'optimisation de la maintenance de la turbine V94.3A de la centrale électrique HAMMA de Alger.

L'optimisation de la maintenance par la méthode AMDEC nous permet de classer les causes selon les effets qu'elles génèrent et de déduire les priorités d'action à mener.

Mots clés

AMDEC, maintenance, turbine, centrale électrique

ملخص

يجب على الشركات الحفاظ على أداة الإنتاج في حالة جيدة، وتقليل تكرار ومدة الانقطاعات العرضية. لهذا ، كرسنا عملنا لتحسين و صيانة التوربينات V94.3A لمحطة توليد الكهرباء الحامة في الجزائر العاصمة. تحسين الصيانة بطريقة AMDEC ، يسمح لنا بتصنيف الأسباب وفقًا للتأثيرات التي تولدها واستنتاج أولويات الإجراءات التي يجب اتخاذها.

كلمات مفتاحية

AMDEC, صيانة,توربين, محطة توليد الكهرباء

Abstract

Companies must maintain the production tool in good condition, and reduce both the frequency and the duration of accidental interruptions. For this, we have devoted our work to the improvement and optimization of the maintenance of the V94.3A turbine of the HAMMA power plant in Algiers.

The optimization of maintenance by the FMECA method, this approach allows us to classify the causes according to the effects they generate and to deduce the priorities for action to be taken.

Keys words

FMECA, maintenance, turbine, power plant

Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1

Chapitre I : Présentation de la centrale

I.1. Introduction	2
I.2. Présentation de la société SONELGAZ	3
I.3. Présentation de la central EL HAMMA.....	3
I.4. La position de la centrale	5
I.5. Les différents équipements de la centrale	5
I.6. Description d'une tranche de production	6
I.7. Organisation de la centrale HAMMA II	7
I.7.1. Subdivision électrique	7
I.7.2. Subdivision mécanique	7
I.7.3. Subdivision exploitation.....	7
I.7.4. Subdivision control économique	7
I.7.5. Subdivision Diagnostic Machines	7
I.8. Les systèmes de contrôle et de commande de la centrale HAMMA II	8
I.8.1. Salle de commande	8
I.8.2. Poste contrôle commande.....	9
I.9. Fonctionnement de la centrale	10
I.9.1. Démarrage	10
I.9.2. Marche normal.....	10
I.10. Caractéristique général du projet.....	10
I.11. Conclusion	11

Chapitre II : Généralités sur les turbines à gaz

II.1 Introduction	12
II.2 Généralités sur les turbomachines	13
II.2.1 Définition de turbomachines	13
II.2.2 Classifications des turbomachines.....	13
II.2.2.1 La nature de fluide	13

Sommaire

II.2.2.2 Sens de l'échange d'énergie	14
II.2.2.3 Le trajet du fluide par rapport à l'axe	15
II.2.3 Eléments d'une turbomachine	16
II.2.4 Types de turbomachines compressibles.....	17
II.2.4.1 La pompe	17
II.2.4.2 Compresseur	17
II.2.4.3 La turbine à vapeur.....	19
II.2.4.4 La turbine à gaz.....	19
II.3 Historique de la turbine à gaz	20
II.4 Définition d'une turbine à gaz	20
II.5 Les éléments d'une turbine à gaz.....	21
II.6 Classification des turbines à gaz	24
II.6.1 D'après le mode de travail	265
II.6.2 Par le mode de construction.....	26
II.6.3 Par le mode de fonctionnement thermodynamique	27
II.7 Principe de fonctionnement de la turbine à gaz	27
II.8 Principales utilisation	28
II.9 Les avantages et inconvénients de la TAG.....	32
II.10 Conclusion	33

Chapitre III : Description de la turbineV94.3A

III.1 Introduction	34
III.2 Revue descriptive de la turbine SIEMENS V94.3A.....	35
III.3 Caractéristique technique de la turbine à gaz SIEMENS V94.3A	35
III.4 caractéristique technique du Compresseur	36
III.5 Caractéristique technique de la Chambre de combustion	37
III.6 Caractéristique technique de La turbine de détente.....	40
III.7 Condition du site.....	41
III.8 Système d'aspiration d'air et filtration	42
III.9 L'alternateur	45
III.10 Le Transformateur	47
III.11 Diesel de secours	48
III.12 Système de gaz naturel.....	49
III.13 Système gasoil	51
III.14 Système à air comprimé.....	52
III.15 Le système de commande	53

Sommaire

III.16 Caractéristique technique du Système d'échappement	53
III.17 Fonctionnement de la centrale	55
III.18 Conclusion.....	56

Chapitre IV : Cycle thermodynamique

IV.1 Introduction	58
IV.2 Rappels théoriques.....	59
IV.3 Etude du cycle simple d'une turbine à gaz	62
IV.4 Le cycle théorique de Brayton	62
IV.5 Etude énergétique de cycle de Baryton	64
IV.5.1 Etude de la compression.....	64
IV.5.2 Etude de la combustion	64
IV.5.3 Etude de la détente	65
IV.5.4 Bilan de cycle.....	65
IV.6 Cycle réel de la turbine à gaz	65
IV.6.1 Etude de la compression (1-2).....	67
IV.6.2 Etude de la transformation dans la chambre de combustion (2-3).....	68
IV.6.3 Etude de la détente (3-4).....	69
IV.7 Cycle de fonctionnement de la centrale	70
IV.8 Cycle de fonctionnement de la centrale	701

Chapitre V : Plan de Maintenance de la centrale

V. Introduction	72
V.1 Définition de la maintenance.....	73
V.2 Objectifs de la maintenance	73
V.3 Les différents types de maintenance	74
V.3.1 La maintenance préventive	76
V.3.1 La maintenance préventive systématique.....	76
V.3.1.2 Maintenance préventive conditionnelle	76
V.3.1.3 La maintenance prévisionnelle	76
V.4 Avantages et inconvénients de la maintenance préventive	76
V.5 La maintenance corrective	77
V.5.1 La maintenance palliative (Les dépannages)	77
V.5.2 La maintenance curative (Les réparations)	77
V.6 Avantages et inconvénients de la maintenance corrective	77
V.7 Les niveaux de la maintenance	77
V.8 Les fonctions du service maintenance	79

Sommaire

V.8.1 Etude (fonction méthode)	79
V.8.2 Fonction préparation.....	79
V.8.3 Fonction d'ordonnancement	80
V.8.4 Fonction réalisation	80
V.8.5 Fonction gestion	80
V.9 Place du service maintenance dans l'entreprise	80
V.10. Les opérations de maintenance	81
V.11 Les temps de maintenance.....	82
V.12 La disponibilité	83
V.13 La fiabilité	83
V.14 Elaboration d'un plan de maintenance	83
V.15 La Gestion de maintenance assistée par ordinateur	84
V.15.1 Les modules SYANA	85
V.15.2 Les documents utilisés dans la SYANA	86
V.16 Les étapes de déroulement les interventions de la maintenance préventive	88
V.17 Planning des interventions préventives.....	88
V.17.1 Les interventions mécaniques	88
V.17.2 Les interventions électriques.....	89
V.18 Les méthodes de maintenance	89
V.18.1 Méthode ISHIKAWA.....	89
V.18.2 Diagramme de Pareto	90
V.18.3 Méthode 5S	90
V.18.4 Méthode KAIZEN	90
V.18.5 Méthode auto maintenance	91

Chapitre VI : Méthode d'analyse et application

VI.1 Méthode AMDEC	922
VI.1.1 Processus de la méthode AMDEC	944
VI.1.2 Les grilles de cotation	977
VI.2 La maintenance appliquée sur TAG V94.3A [32].....	988
VI.2.1 Les inspections de la machine TAG.....	988
VI.3 Interprétation des résultats de l'AMDEC	1099
VI.3.1 Application de la méthode AMDEC sur les inspections 2021	1099
VI.3.2 Recommandation	1133
VI.4 Essai Diesel	1133
VI.4.1 Procédure de contrôle périodique du diesel de secours 20XJP01AA031	1133

Sommaire

VI.5 Inspection de la TGM 2022 [31]	1166
VI.6 Conclusion	1188
Conclusion générale	1199
Références bibliographiques	
Annexes	

Liste des abréviations

Nomenclature

Symboles	Désignations	Unités
H	Enthalpie massique totale	J/kg
H	Enthalpie massique	kJ/kg
W	Travail massique spécifique	kJ/kg
T	Température	K
Cp	Chaleur spécifique moyenne à pression constante	J/ (kg. k)
Pu	La puissance utile	W
Qcc	Chaleur spécifique fournie par la chambre de combustion	KJ/kg
N	Rendement	-
$\dot{m}_a$	Débit massique de l'air	Kg/s
$\dot{m}_c$	Débit du combustible	Kg/s
Q	Quantité de chaleur	J

Abréviations

SPE	société de production d'électricité
Sub	subdivision
C	Compresseur
C.C	Chambre de combustion
T	Turbine
PCC	Poste Control Commande
THP	Turbine haut pression
TBP	Turbine basse pression
GTP	Groupe Turbo Propulseur
GTR	Groupe Turbo Réacteur
IM	Inspection Majeur
TAG	Turbine à Gaz
MTBF	Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement
MTTR	Moyenne des Temps Techniques de Réparations
MTTA	Moyenne des Temps Techniques d'Arrêt
AEN	AnsaldoEnergia Noura
MPC	Maintenance préventive conditionnelle
MCO	Maintenance corrective
MPS	Maintenance préventive systématique

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1: Maquette de la Centrale el HAMMA.	4
Figure 2: La position de la centrale sur Google Maps.....	5
Figure 3: Organigramme des groupements de la centrale.	8
Figure 4: Vue générale de la salle de commande.....	9
Figure 5: Vue générale du PCC.....	10
Figure 6: Turbine à gaz SIEMENS V94.3A.	11

Chapitre II

Figure 7: sens de l'échange d'énergie.	15
Figure 8: Roue d'une turbomachine radiale.....	15
Figure 9: Roue d'une turbomachine axiale.....	16
Figure 10: Roue d'une machine semi-axiale.....	16
Figure 11: compresseur axial.	18
Figure 12: les constituants d'un compresseur centrifuge.	18
Figure 13: le premier brevet relatif d'une turbine à gaz.	21
Figure 14: les éléments principaux de la turbine à gaz.....	21
Figure 15: les aubes de compresseur d'une TAG.	22
Figure 16: la tuyère (directrice) du 1 ^{er} étage.....	24
Figure 17: schéma d'une turbine à gaz à action et réaction.	26
Figure 18: schéma d'une TAG mono arbre.	26
Figure 19: schéma d'une TAG bi-arbre.....	27
Figure 20: Système de fonctionnement de la TAG V94.3A [23]	28
Figure 21: Schéma de principe de fonctionnement de la TAG.....	28
Figure 22: moteur turbocompressé.....	29
Figure 23: moteur d'avion dit turboréacteur.....	30
Figure 24: moteur turbopropulseur.....	31
Figure 25: centrale de cogénération.	32

Chapitre III

Figure 26: compresseur à 17 étages de la turbine V94.3A.	37
Figure 27: vue interne de la chambre de combustion de TAG V94.3A.	38
Figure 28: Schéma de la chambre de combustion.....	38
Figure 29: injecteur hybride fuel/gaz.....	39
Figure 30: Etages d'aubes de la turbine V94.3A.	41
Figure 31: coupe du système de prise d'air.	42
Figure 32: vue externe du système d'aspiration d'air et de filtration.....	43
Figure 33: Vue en éclatée de la turbine SIEMENS V94.3A.....	44
Figure 34: alternateur 50 THR (photo prise pendant la maintenance majeure 2020).	46
Figure 35: Eléments constitutifs de l'alternateur.	47
Figure 36: Transformateur principal.	48
Figure 37: Groupe diesel.....	49
Figure 38: Positionnement du poste gaz de la centrale du Hamma II.	50
Figure 39: Pompe centrifuge.....	52
Figure 40: système d'échappement (diffuseur + cheminée).....	54

Liste des figures

Chapitre IV

Figure 41: Transformation 1-2 sur le diagramme P-V (de Clapeyron).	60
Figure 42: schéma d'une turbine à gaz	66
Figure 43: Représentation du cycle réversible de Brayton sur le diagramme T-S.....	63
Figure 44: Cycle de Brayton d'une turbine à gaz.....	64
Figure 45: cycle réel de la turbine à gaz dans le diagramme (T-S) [15].	66
Figure 46: représentation de la notion du travail d'un compresseur.	67
Figure 47: Représentation de la notion de travail d'une turbine.	69

Chapitre V

Figure 48: Schéma explicatif de la maintenance corrective.	77
Figure 49: Temps caractéristique pour d'une intervention.	77
Figure 50: La page d'accueil SYANA.	84
Figure 51: Les différents modules et sous-modules de SYANA [31].....	86
Figure 52: Demande d'intervention (DI).....	86
Figure 53: Ordre de travail (OT) [31].....	87
Figure 54: Demande d'achats stock [31].	88
Figure 55: Diagrammes causes effets.	90

Chapitre VI

Figure 56: Types de l'AMDEC.....	93
Figure 57: Démarche pratique de l'AMDEC machine.	955
Figure 58: Exemple de feuille d'AMDEC. [14].....	977

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau 1: Types des machines à fluide. [5].....	14
Tableau 2: Avantages et Inconvénients du compresseur axial et centrifuge.	19
Tableau 3: Classification des turbines à gaz.	25

Chapitre III

Tableau 4: schéma de caractéristique technique de la TAG SIEMENS.....	35
Tableau 5: caractéristique du compresseur.	37
Tableau 6: schéma de caractéristique de la chambre de combustion.	40
Tableau 7: schéma de caractéristique de la turbine.	42
Tableau 8: schéma de caractéristique du site.	42
Tableau 9: caractéristique technique du système d'air.	43
Tableau 10: Dimensions et poids de la turbine à gaz V94.3A.....	44
Tableau 11: caractéristique technique de l'alternateur.	46
Tableau 12: caractéristique technique de groupe diesel.	50
Tableau 13: caractéristiques technique du poste gaz.....	51
Tableau 14: caractéristique du système gasoil.	51
Tableau 15: Caractéristique techniques du système d'échappement.	55

Chapitre V

Tableau 16: Les types de maintenance.	75
Tableau 17: fonctions de la maintenance.....	79

Chapitre VI

Tableau 18: Limites de criticité [24].	966
Tableau 19: Grille de cotation de la probabilité de non détection (D).	977
Tableau 20: Grille de cotation de gravité (G).	977
Tableau 21: Grille de cotation d'occurrence (F).	977
Tableau 22: Les inspections mineures (M) [32].	988
Tableau 23: Inspection parcourt gaz chaud (HGPI).	999
Tableau 24: les inspections majeures (M).	1033
Tableau 25: Essai Hebdomadaire du diesel de secours pour le 23/05/2022.....	1144

Introduction générale

Introduction générale

Le monde de l'énergie est très vaste, il comporte plusieurs secteurs qui sont comptés parmi les points stratégiques de l'économie d'un pays, on compte parmi ces secteurs l'énergie électrique.

Notre pays étant en voie de développement, a déjà accédé à ce secteur par la création des installations spécialisées dans la production de cette énergie, parmi ces installations : les turbines à gaz.

La turbine à gaz est une machine thermique, l'idée de sa fabrication remonte au 18^{ème} siècle. Elle transforme l'énergie thermique en énergie mécanique, pour des fins bien précis et dans différents domaines : domaine pétrolier, production électrique....etc.

Dans notre travail cette dernière est utilisée pour produire de l'électricité.

La maintenance de la turbine à gaz c'est une opération nécessaire visant à maintenir à un degré convenable les moyens de production à un prix optimum pour satisfaire la disponibilité et la sécurité des équipements.

La maintenance s'impose impérativement dans la fonction de la gestion de la production même et exige des décisions pour que ses objectifs, préalablement définis soient atteints.

La méthode AMDEC occupe une place importante dans l'optimisation de la fonction maintenance, en effet elle rend le système fiable tout en faisant diminuer le nombre de pannes.

Par ailleurs on a effectué un stage pratique au niveau de la centrale électrique d'EL HAMMA.

Notre travail est dans le but d'étudier l'état de fonctionnement de la centrale électrique d'EL HAMMA, cette étude est basée sur l'analyse de l'historique des pannes des turbines, en utilisant la méthode AMDEC.

Pour mener à bien notre travail, on a opté pour une division en cinq chapitres.

Dans le premier chapitre nous donnerons une présentation sur la centrale d'EL HAMMA ainsi que son organisation.

Dans le deuxième chapitre nous allons définir les turbomachines en générale, puis nous allons nous intéresser au fonctionnement des turbines à gaz et leurs différents types.

Dans le troisième chapitre on effectuera une description de la turbine à gaz V94.3A.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude de cycle thermodynamique qui représente bien les transformations de la turbine à gaz V94.3A.

Le cinquième chapitre expose les différents types de maintenance et l'application de la méthode AMDEC.

Chapitre I :
Présentation de la
centrale

I.1. Introduction

La centrale électrique TG-Hamma de la S.P.E occupe une position stratégique dans le réseau d'alimentation électrique de la capitale. Mise en service en 2002, elle était initialement conçue comme une centrale de pointe, destinée à renforcer les capacités de production électriques lors des plages de fortes consommations. L'évolution des besoins et de la consommation électrique plus rapide que le développement des capacités de production dans l'algérois ont fait qu'elle joue aujourd'hui un rôle de centrale de base, fonctionnant en continu. Elle affiche, en matière de disponibilité de production d'électricité un taux élevé (98 % à 99 %) supérieur à la moyenne internationale (90% à 95%).

I.2. Présentation de la société SONELGAZ

La société National SONELGAZ est le monopole de gestion de l'énergie électrique. Elle assure la production d'électricité à partir des sources thermiques et hydrauliques répondant aux exigences de disponibilité, fiabilité, sécurité et protection de l'environnement. Elle est également chargée de commercialiser l'électricité produite.

Crée en Janvier 2004, elle dispose d'un parc de production d'une capacité qui totalise une puissance installée de 6740MW, composé de quatre filières de types et de paliers de puissance différentes.

Celui-ci se décompose comme suit :

- Turbine à Vapeur : 2740 MW
- Turbine à Gaz : 3576 MW
- Hydraulique : 249 MW
- Diesel : 175 MW

I.3. Présentation de la central EL HAMMA

La centrale turbine à gaz HAMMA II est conçue et réalisée dans le but de sécuriser la capitale en matière d'alimentation en énergie électrique , elle a été mise en service en 2002 par le constructeur italien Ansaldo pour renforcer une ancienne installation de deux turbines 2x209MW datant de 1972 mais toujours opérationnelle en raison même de qualités de son services d'entretien et de maintenance. A quelques dizaines de mètre du jardin d'essai, à la cité El HAMMA au centre d'Alger, cette centrale occupe avec son bâtiment administratif, (voir la figure 1) ses ateliers, ses installations anti-incendie, les aéro-réfrigérants, des alternateurs et les bacs à fuel, un site de deux hectares. Ses équipements de dernière génération deux turbines SIEMENS de 209 MW et un post d'évaluation de 220HV chacun lui assurent une polyvalence et un fonctionnement en mode de combustion hybride : le gaz comme combustible principal et le fuel comme combustibles de secours. [1]



Figure 1: Maquette de la Centrale el HAMMA.

I.4. La position de la centrale

La centrale est installée sur un terrain situé dans le quartier HAMMA dans le centre d'Alger.

Le terrain disponible pour l'implantation du projet HAMMA II à une superficie de l'ordre de 1.5Ha (voir la figure 2)

Il est délimité :

- Au Nord par la voie de chemin de fer (coté avenue de l'ALN).
- Au sud par la rue HASSIBA BEN BOUALI.
- A l'Est par l'unité ASMIDAL.

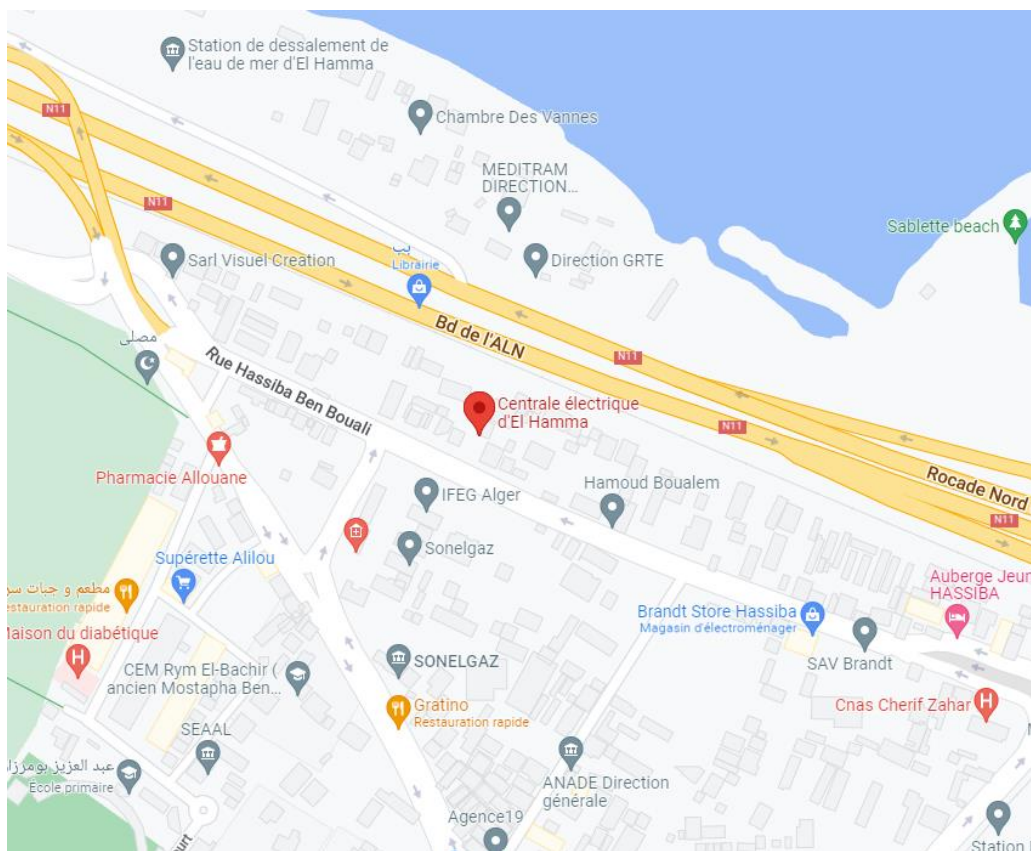


Figure 2: La position de la centrale sur Google Maps.

I.5. Les différents équipements de la centrale

Le matériel électrique existant dans la centrale du Hamma est :

- Deux transformateurs principaux : 15.75/225 kV élévateur de tension.
- Deux disjoncteurs automatiques.
- Un transformateur 6/63 kV de réseau-groupe.
- Trois tableaux 6kV.
- Quatre transformateurs 6/0.4 kV groupe auxiliaire.

- Deux transformateurs 400/220 V éclairage.
- Deux tableaux de distribution service commun.
- Un groupe électrogène.
- Trois systèmes 220 VCC0.
- Six systèmes 24 VCC.
- Deux groupes tableaux de mesure et deux protections pour générateur et de transformateurs principaux.
- Deux groupes tableaux de mesure pour transformateur de réseau.

I.6. Description d'une tranche de production

La centrale HAMMA II, contient deux tranches de production d'énergie électrique identiques qui présentent chacune une puissance de 209MW et une tension de 225KV par l'intermédiaire d'un transformateur élévateur de tension vers le réseau de transport.

La tranche de production est composée de trois éléments principaux qui sont :

- Turbine à gaz.
- Alternateur.
- Transformateurs.

La conception de la centrale ainsi que l'installation des turbines. Il s'agit de deux turbines à gaz SIEMENS de type V94.3A.

Ces turbines de la famille Siemens/KVU ont pour caractéristiques d'être de type mono-arbre et construites en une seule enveloppe. Elles présentent l'avantage d'être dotées de bruleurs hybrides, permettant le fonctionnement aussi bien par combustibles gazeux (gaz naturel, gaz de haut fourneau), ou combustible liquide, tels les huiles combustibles légères, et sont apte à fonctionner en cycle simple, ou cycle combiné. [2]

La mission de la centrale est de satisfaire les programmes de production d'électricité établis par les mouvements d'énergie demandée et de fournir les prestations dans les meilleures conditions de qualité avec la continuité nécessaire. À cette fin, elle est sensée :

- Garantir la disponibilité des moyens de production mis à leur disposition et la conformité de service.
- Assurer à leurs installations l'exploitation et l'entretien dans les meilleures conditions de cout.
- Superviser et coordonner les activités d'exploitation et de maintenance.
- Assurer la maitrise des ouvrages vis-à-vis de l'engineering des moyens de production.

I.7. Organisation de la centrale HAMMA II

Afin de gérer efficacement le bon fonctionnement de la centrale, cinq subdivisions sont créées (voir figure 3).

I.7.1. Subdivision électrique

Contrôle, dirige et suit tout travail de domaine électrique, de régulation et automatique.

I.7.2. Subdivision mécanique

Charger de l'analyse et du contrôle de l'exécution des travaux d'aspect mécanique.

I.7.3. Subdivision exploitation

Chargée essentiellement :

- D'augmenter et diminuer l'énergie produite en démarrant et en arrêtant les groupes selon les programmes établis par le mouvement d'énergie.
- De la conduite, la surveillance des installations de production ainsi que de la transmission des informations à propos de leur fonctionnement aux services concernés.
- Assurer la responsabilité de la centrale en dehors des heures de travail.
- Prendre les mesures utiles en cas de défaillance.
- Contrôler l'ensemble des paramètres de fonctionnement.

I.7.4. Subdivision control économique

Sa mission principale se résume à :

- Suivre les paramètres et améliorer les performances des équipements.
- Faire les essais mensuels de la consommation spécifique et contrôler son évolution.
- Proposer les mesures jugées utiles pour la bonne exploitation.

I.7.5. Subdivision Diagnostic Machines

Destinée à :

- Etablir les diagnostics du comportement vibratoire et thermique des machines tournantes.
- Suivre les mesures et essais électriques des moteurs dans toutes les centrales du sous groupement.
- Proposer des consignes d'exploitation et déclencher des opérations d'entretien.



Figure 3: Organigramme des groupements de la centrale.

I.8. Les systèmes de contrôle et de commande de la centrale HAMMA II

I.8.1. Salle de commande

Il s'agit du centre de supervision de la centrale, (voir figure 4) au niveau duquel toutes les commandes disponibles sont centralisées. C'est un type de SNCC dont l'interaction avec le processus de la centrale permet d'assurer :

- La surveillance des états et paramètres.
- La rapidité et la sécurité des actions.

- La détection des anomalies.
- l'élimination des défauts.
- L'optimisation des réglages

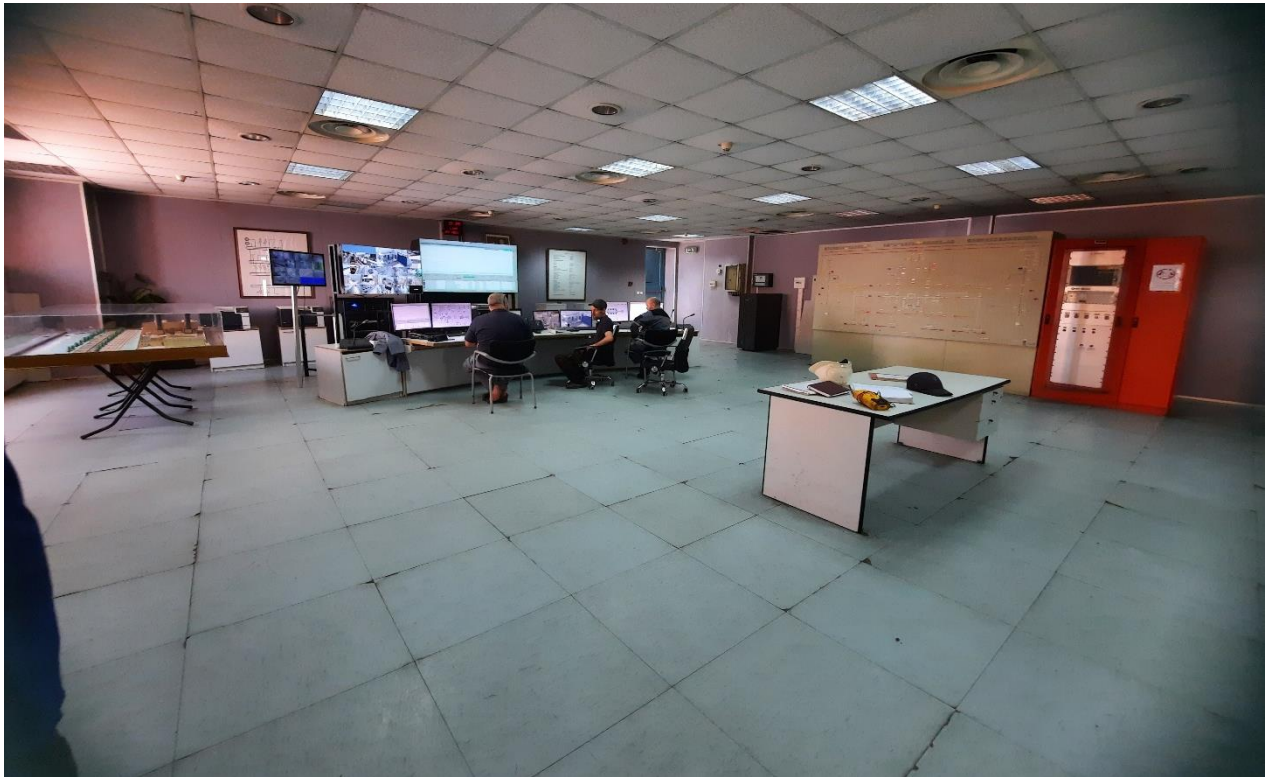


Figure 4: Vue générale de la salle de commande.

I.8.2.Poste contrôle commande

C'est un système qui comprend tout l'équipement électrique de commande indispensable au démarrage, au fonctionnement normal et à l'arrêt des sécurités des turbines à gaz et les systèmes auxiliaires de la centrale (voir la figure 5).



Figure 5: Vue générale du PCC.

I.9.Fonctionnement de la centrale

La centrale est conçue pour fonctionner en deux modes :

I.9.1. Démarrage

Le démarrage des groupes se fait soit :

- par l'intermédiaire des transformateurs de démarrage via l'un des transformateurs de soutirage.
- Par le transformateur du réseau 63V.
- Par le groupe électrogène.

I.9.2. Marche normal

Dans ce mode les tableaux moyen tension et les auxiliaires sont alimentés à partir des groupes qui doivent produire :

- Une puissance nominale de base aux bornes des alternateurs de 210.4 KW.
- Une tension aux secondaires des transformateurs principaux de 220 V.

I.10. Caractéristique général du projet

Les turbines à gaz siemens/KVU sont des machines à un seul arbre ayant une seule enveloppe (voir figure 6). Elles sont aptes à faire fonctionner des générateurs dans des centrales à la charge de base et à la charge de crête. Ainsi qu'à des applications de commandes mécaniques. On peut utiliser ces turbines dans des cycles combinés et pour des applications

de réchauffage de district. Elles peuvent fonctionner par des combustibles liquides, tels que l'huile combustible légère, ou par des combustibles gazeux ayant des valeurs calorifiques différentes, tels que gaz naturel ou gaz de haut fourneau. [4]

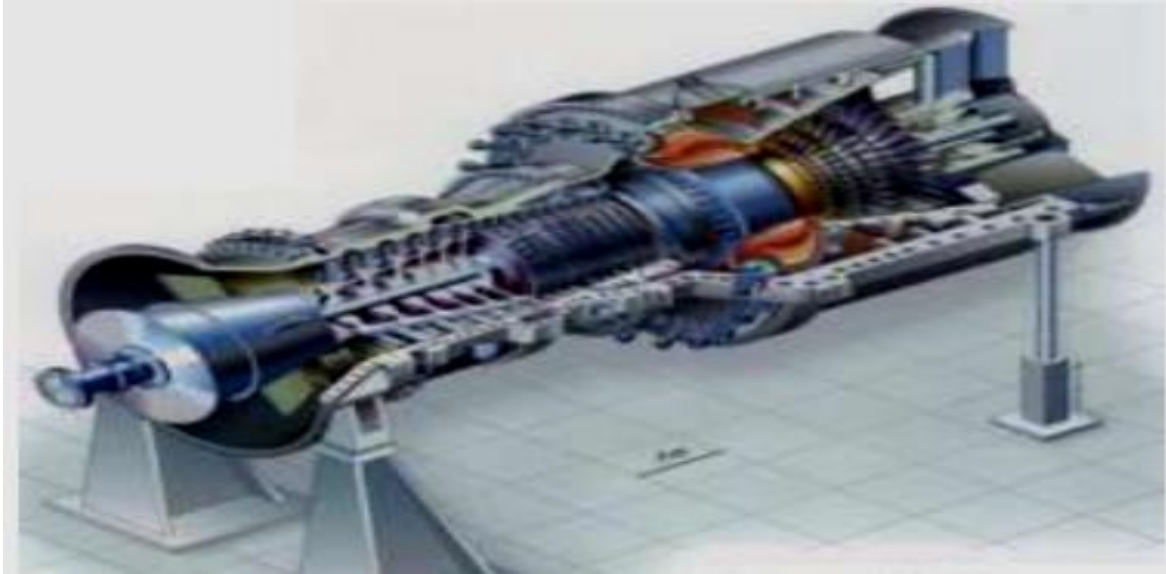


Figure 6: Turbine à gaz SIEMENS V94.3A.

I.11. Conclusion

Nous avons tenté dans ce premier chapitre de présenter brièvement la centrale électrique d'El HAMMA II, et ses principales parties.

***Chapitre II :
Généralités sur les
turbines à gaz***

II.1 Introduction

Les turbomachines forment une famille importante d'appareils qui utilisent un fluide pour effectuer une transformation d'énergie. Parmi cette famille de machines, on trouve les machines axiales et autres telles que (les soufflantes, les compresseurs, les turbines à gaz ou à vapeur, etc.).

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

Les turbines à gaz sont définis par Râteau comme étant des appareils dans lesquels a lieu un échange d'énergie entre un rotor tournant autour d'un axe à vitesse constante et un fluide en écoulement permanent.

Dans ce chapitre, nous allons définir les turbomachines en général puis nous allons intéresser, d'une manière générale au fonctionnement des turbines à gaz du point technologique, aux différents types des turbines à gaz qui existent, et enfin les principales utilisations.

II.2 Généralités sur les turbomachines

II.2.1 Définition de turbomachines

Les turbomachines sont des machines dans lesquelles un fluide (liquide ou gaz) échange de l'énergie à l'aide d'un ou plusieurs imposeurs (appelés aussi rotors ou roues). Ces derniers sont munis d'aubes (pompes et compresseurs), d'ailettes (turbines à gaz ou à vapeur) ou augets (turbine hydraulique Pelton).

L'échange d'énergie s'effectue dans le rotor et résulte du travail des forces aérodynamiques sur les aubes produites par l'écoulement du fluide autour de celles-ci, et qui résultent principalement de la différence de pression entre les deux faces des aubes.

Une turbine peut remplir diverses fonctions, notamment transférer un fluide d'une pression inférieure à une pression supérieure, ou lui fournir une augmentation d'énergie cinétique ; dans ce cas, sa rotation absorbe la puissance, elle constitue donc une turbine réceptrice telle qu'une turbine Pompes, ventilateurs, soufflantes, compresseurs... A l'inverse, un fluide peut aussi passer d'un milieu haute pression à un milieu basse pression, ou voir son énergie cinétique diminuer, la fonction de la machine est de capter l'énergie dégagée par cette détente ou cette décélération, il constitue donc un Entraînement des turbines, telles que les turbines à eau, les turbines à vapeur, les éoliennes, les turbopropulseurs, les turboréacteurs.

II.2.2 Classifications des turbomachines

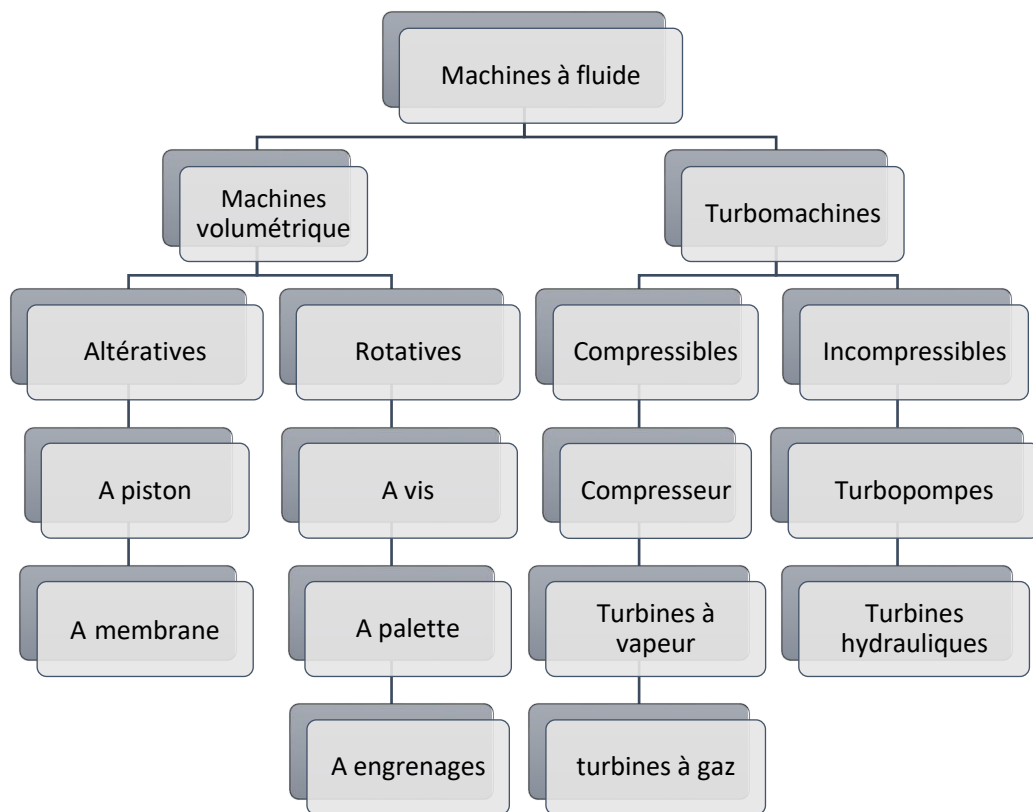
Un certain nombre de critères sont utilisés pour classer les turbines. Le plus important est :

II.2.2.1 La nature de fluide

Selon le fluide, compressible ou non, il existe deux séries de turbines :

- Turbomachines à fluide compressible : Dans ces machines, des changements de densité du fluide se produisent avec des changements de pression. Les turbines à gaz, les turbines à vapeur et les compresseurs sont classés dans cette catégorie (voir le tableau 1).
- Turbomachines à fluide incompressibles : Dans ces machines, la densité du fluide reste constante pendant le processus d'échange d'énergie. Les pompes et les turbines à eau font partie de cette deuxième catégorie.

Tableau 1: Types des machines à fluide. [5]



II.2.2.2 Sens de l'échange d'énergie

On distingue les machines réceptrices qui reçoivent du travail et les machines motrices qui en fournissent [6] :

- Les machines motrices sont les turbines à vapeurs, à gaz et les turbines hydrauliques. Elles font, généralement, détendre un fluide pour recueillir sur leur arbre un travail mécanique.
- Les machines réceptrices sont le siège d'une compression (élévation de pression) du fluide. Parmi les machines réceptrices on trouve les turbopompes, ventilateurs, turbosoufflantes, turbocompresseurs et les hélices aériennes et marines (voir la figure 7).

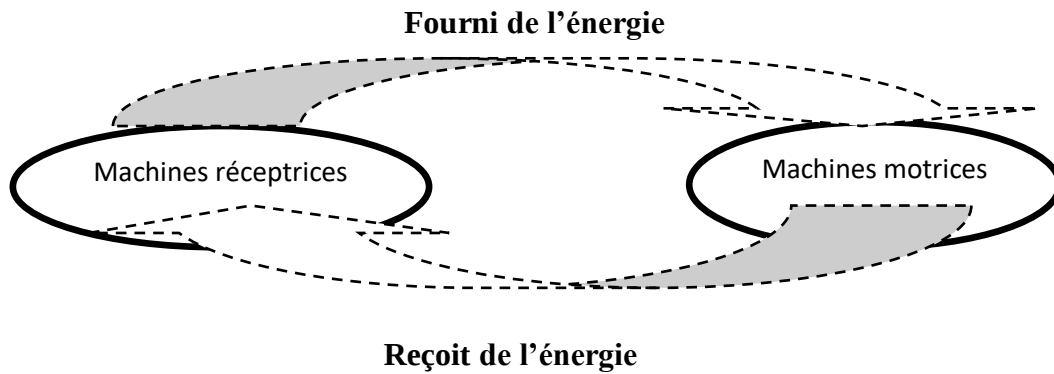


Figure 7: sens de l'échange d'énergie.

II.2.2.3 Le trajet du fluide par rapport à l'axe

La forme de trajectoire du fluide dans la roue d'une turbomachine fournit également une base de classification des types de turbomachines. En générale, on distingue :

a) Turbomachines radiales

Dans ce type de turbomachine, le fluide traverse la roue (rotor) perpendiculairement à l'axe de l'arbre de la machine (voir la figure 8). Pour les machines radiales, on distingue la machine centrifuge (écoulement s'éloigne de l'axe) et les machines centripètes (l'écoulement se rapproche de l'axe).[7]

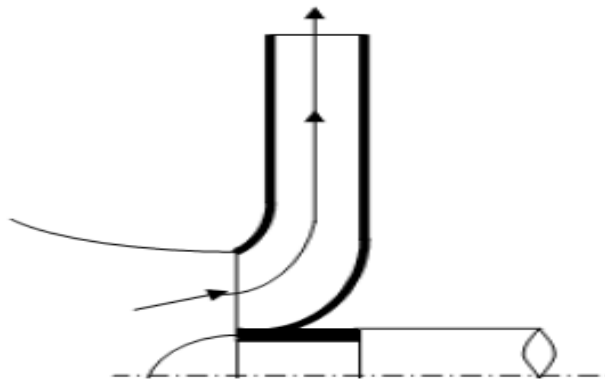


Figure 8: Roue d'une turbomachine radiale.

b) Turbomachines axiales

Ici, le fluide traverse la roue de la machine parallèlement à l'axe (voir la figure 9).

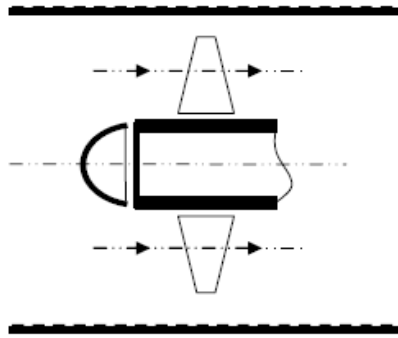


Figure 9: Roue d'une turbomachine axiale.

c) Turbomachines semi-axiales

Ce sont des machines où le fluide traverse la roue de façon diagonale. Elles sont aussi appelées machines hélico-centrifuges ou hélicoïdale (voir la figure 10).

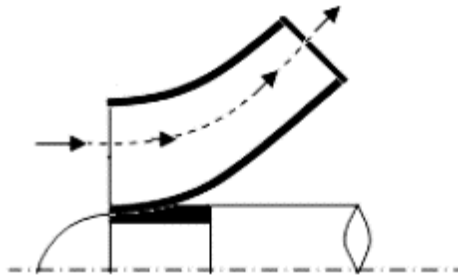


Figure 10: Roue d'une machine semi-axiale.

II.2.3 Eléments d'une turbomachine

Dans les machines multicellulaires, chaque étage ne comprend généralement que deux éléments, à savoir un distributeur et un rotor pour les turbines, et un rotor et un diffuseur pour les pompes et compresseurs.

➤ Le distributeur

Son rôle est de conduire le fluide depuis la section d'entrée de la machine à la section d'entrée du rotor en lui donnant une vitesse et une direction appropriée. Le distributeur peut être une simple canalisation ou comprendre une couronne d'aubes fixe qui est parfois orientable afin de réguler le débit.

➤ Le rotor ou la roue mobile

Il est le cœur de la turbomachine. C'est l'élément au sein duquel s'effectue l'échange d'énergie entre le fluide et la machine par le travail des forces aérodynamiques sur les aubes en rotation.

➤ Le diffuseur

Son rôle est de collecter le fluide à la sortie du rotor et l'amener à la section de sortie de la machine. Comme pour le distributeur, le diffuseur peut contenir une couronne d'aubes fixes qui a pour fonction, s'il y a lieu, de redresser le fluide de façon à le ramener à sa direction primitive, généralement axiale, avant son évacuation vers l'extérieur.

II.2.4 Types de turbomachines compressibles**II.2.4.1 La pompe**

Une pompe est une machine hydraulique qui aspire et refoule un liquide (l'eau, l'huile, l'essence, les liquides alimentaires etc....) d'un point à un endroit voulu. La pompe est destinée à élever la charge du liquide pompé. La charge ou l'énergie est la somme de trois catégories d'énergie :

- ✓ Energie cinétique.
- ✓ Energie potentielle.
- ✓ Energie de pression.

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

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

Le rôle de la pompe est de rendre possible cet apport en déterminant la pression et le débit nécessaire. Elle établit ensuite la mise en pression du liquide caloporteur afin de faciliter son transport dans les circuits.

II.2.4.2 Compresseur

Le rôle du compresseur est d'augmenter la pression du fluide admis dans la turbine (voir le tableau 2).

Les compresseurs sont en général de deux types :

- a- compresseur axiaux.
- b-compresseur centrifuges.

A. Compresseur axial

Les compresseurs axiaux sont de compresseurs à haute vitesse et à grand volume. Ils sont caractérisés par le nombre d'étage important et le taux de compression n'est pas élevé (voir la figure 11).

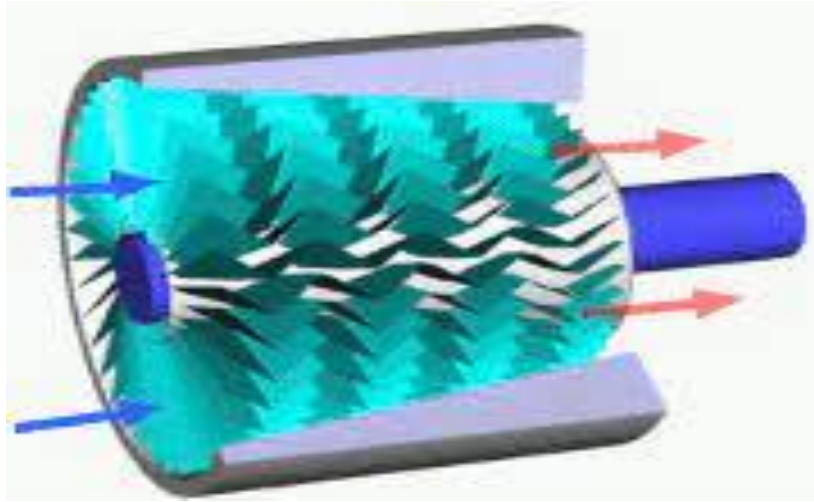


Figure 11: compresseur axial.

B. Compresseur centrifuges

C'est une machine dynamique, augmente l'énergie du gaz comprimé grâce à la force centrifuge qui est provoqué par le mouvement de rotation des roues (voir la figure 12).

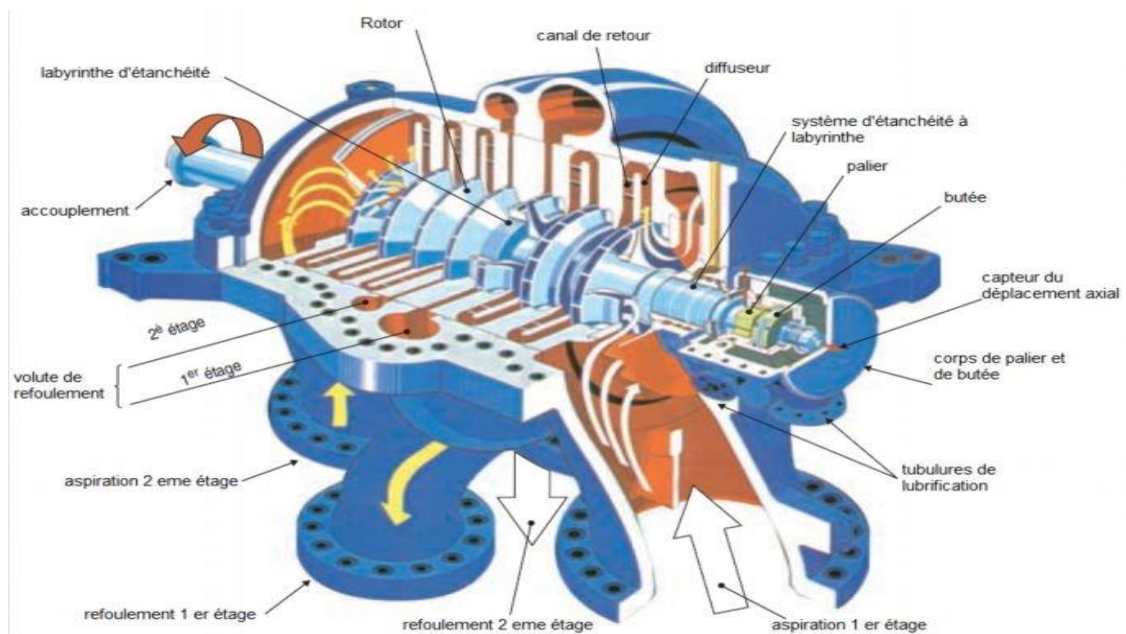


Figure 12: les constituants d'un compresseur centrifuge.

Tableau 2: Avantages et Inconvénients du compresseur axial et centrifuge.

Type de compresseur :	Avantages	Inconvénients
Centrifuge	- Une large plage de fonctionnement. - Un faible entretien. - Une fiabilité élevée.	- Instable à débit faible. - Un rendement modéré.
Axial	- Un rendement élevé. - Fonctionnement à grande vitesse. - Ecoulement plus élevé pour une taille donnée.	- Un taux de pression faible par étage. - Une plage de débit étroite. - Des aubages fragiles et onéreuses

II.2.4.3 La turbine à vapeur

La turbine à vapeur est un moteur thermique à combustion externe, fonctionnant selon le cycle thermodynamique dit Clausius-Rankine. Ce cycle se distingue par le changement d'état affectant le fluide moteur qui est en général de la vapeur d'eau. Elle transforme l'énergie thermique de la vapeur d'eau pendant la détente en énergie mécanique de rotation d'arbre pour entraîner un dispositif mécanique tournant. [9]

Ce cycle comprend au moins les étapes suivantes :

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

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

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

II.2.4.4 La turbine à gaz

Une turbine à gaz est une machine à flux continu, à combustion interne qui permet de transformer l'énergie contenue dans le combustible en énergie mécanique utilisable sur

l'arbre de la turbine (machines industrielles) ou sous forme d'énergie propulsive dans un jet (turboréacteurs). Dans son architecture la plus simple, la turbine à gaz, qui aspire l'air ambiant et rejette les gaz brûlés à l'atmosphère, fonctionne en circuit ouvert.

Elle comporte un compresseur et une turbine couplés mécaniquement sur un arbre, et une chambre de combustion intercalée entre ces deux organes. [10]

II.3 Historique de la turbine à gaz

Les turbines à gaz modernes sont présentées aujourd'hui dans notre vie courante, que ce soit pour la génération d'électricité ou dans le transport aérien. [4]

Parmi les dates marquantes dans le développement de la turbine à gaz, nous pouvons citer :

- **1791**: Premier brevet relatif à une turbine à gaz décerné à John BARBER en Angleterre.
- **1900-1904** : L'Allemand Stolze propose une turbine à air chaud comportant un compresseur axial multi-étage et une turbine axiale.
- **1905** : Conception de la turbine à explosion selon Holzwarth.
- **1909-1910** : Première application industrielle d'une turbine à gaz en Allemagne.
- **1933** : Perfectionnement de la turbine de Holzwarth par Brown Boveri & Cie avec l'adjonction d'une seconde chambre de combustion.
- **1937** : Mise en service du premier groupe compresseur/turbine à gaz 'Houdry' à la raffinerie de Marcus Hook en Pennsylvanie, USA.
- **1939** : Mise en service de la première turbine à gaz de 4000 KW à la centrale de Neuchâtel.

II.4 Définition d'une turbine à gaz

Les turbines à gaz sont construites dans une gamme très large de puissance de 25 KW à 250 MW.

La turbine à gaz est une machine à flux continu à combustion interne, dont le rôle est de transformer l'énergie thermique due à la combustion d'un hydrocarbure en énergie mécanique (couple mécanique sur l'arbre de la turbine), (voir la figure 13).

Les composants de base d'une turbine à gaz sont un compresseur, une chambre de combustion et une turbine.

La puissance fournie par une TAG dépend des caractéristiques de l'air aspiré : température, humidité et pression. Elle va donc varier suivant la saison et l'altitude du lieu d'implantation

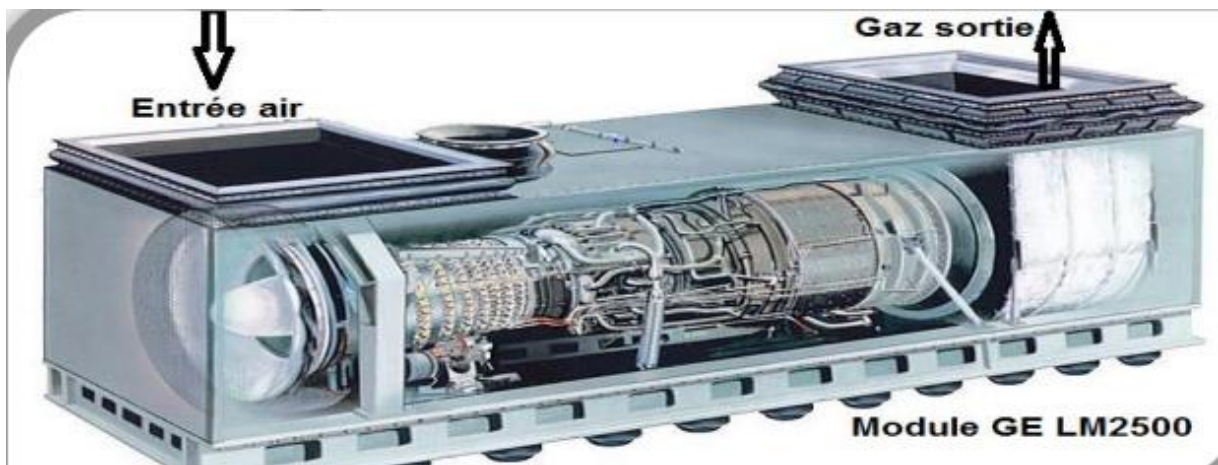


Figure 13: le premier brevet relatif d'une turbine à gaz.

II.5 Les éléments d'une turbine à gaz

Dans sa forme la plus simple et la plus répandue, une turbine à gaz est composée de trois éléments (voir la figure 14).

- Un compresseur : aspire l'air et le comprime.
- Chambre de combustion : carburant pompé et allumé, pour brûler de l'air comprimé.
- Turbine : gaz chauds convertis en travail pour actionner le compresseur et la charge externe.

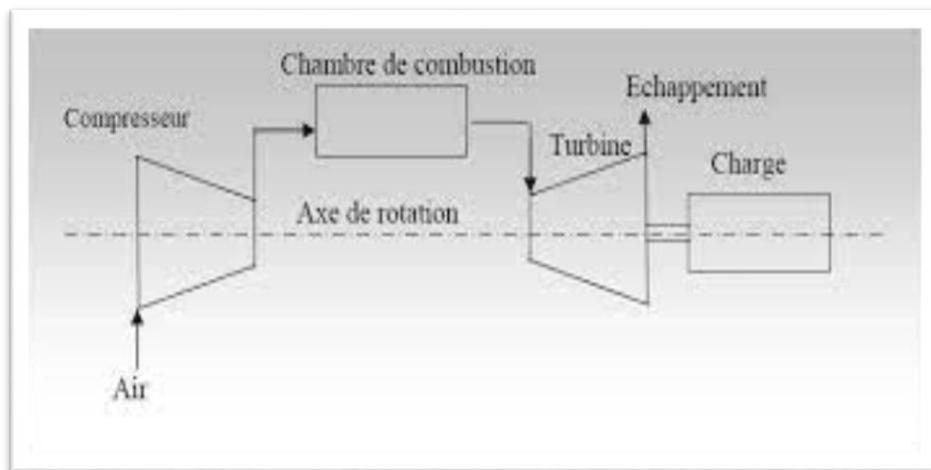


Figure 14: les éléments principaux de la turbine à gaz.

1. Le compresseur

Est un organe mécanique destiné à augmenter la pression d'un gaz et donc son énergie. Le compresseur est de type axial à 17 étages de forme conique. Dans le rôle est d'augmenter la pression du fluide admis dans la turbine. L'air aspiré (pression atmosphérique 1.013 bar) à une température ambiante, s'écoule en ligne droite de l'admission vers sa sortie (pression 4.9 bar et une température de plus de 200 °c).

Les aubes rotatives (rotor) fournissent de la force pour augmenter la vitesse de l'air dans chaque étage et les aubes stationnaire (stator) convertissent la vitesse en pression et guident aussi l'air vers le prochain étage du rotor.

Une partie d'air comprimé est dirigée vers les chambres de combustion, l'autre partie est destinée pour le refroidissement des tubes à flamme des chambres de combustion.

Le compresseur comprend :

• Corps d'admission

Le corps d'admission est situé sur la partie avant de la machine, sa fonction principale est de diriger l'air uniformément depuis le caisson d'aspiration jusqu'au compresseur.

•Aubes du compresseur

Les aubes du compresseur convertissent l'énergie mécanique en énergie cinétique en tournant les aubes et l'énergie cinétique en pression de l'air comprimé dans les aubes stationnaires et donc ensemble avec les ailettes contribuent à la hausse de pression (voir la figure 15).

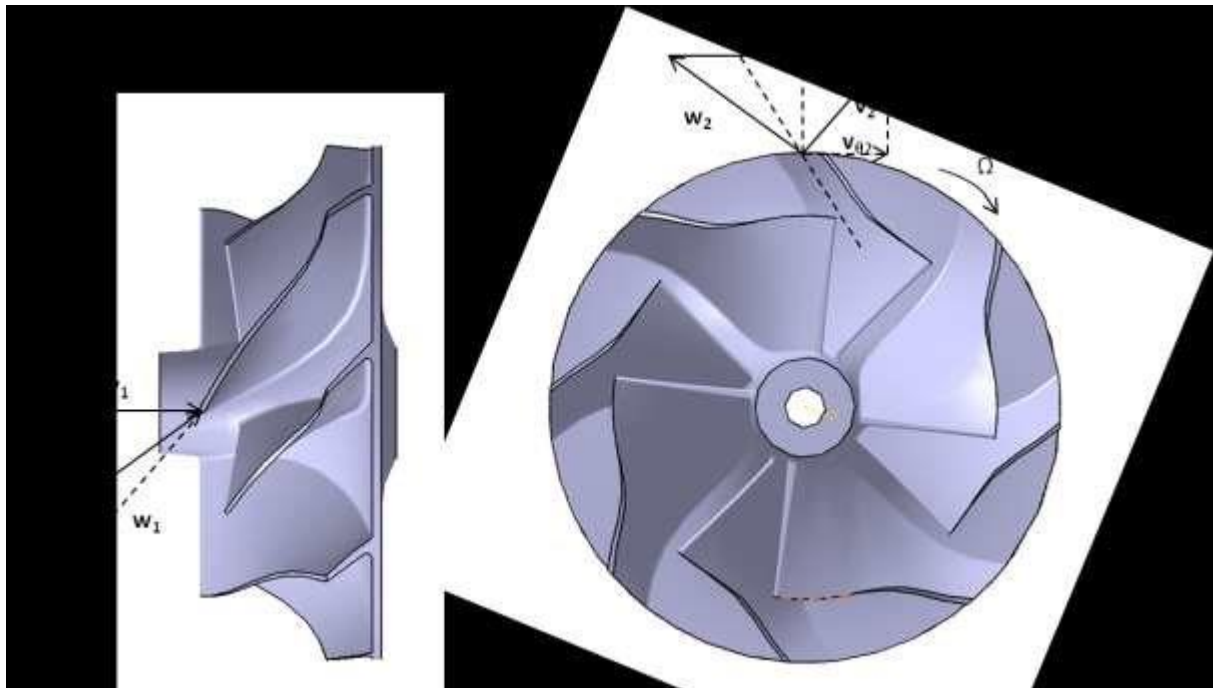


Figure 15: les aubes de compresseur d'une TAG.

•Rotor du compresseur

Le rotor de compresseur est constitué d'un assemblage de disques portant des aubes et un bout d'arbre comportant entre une portée de palier.

2. Chambre de combustion

Le rôle de la chambre de combustion est d'assurer une combustion complète du mélange d'air comprimé sortant du compresseur et du gaz (ou carburant) injecté dans la chambre, et d'opposer la plus faible résistance possible à l'écoulement des gaz brûlés vers la turbine de détente. En d'autres termes, elle permet d'assurer la conversion de l'énergie calorifique.

A l'intérieur de chaque chambre de combustion se trouvent les tubes de flammes. Il y a au total 06 chambre de combustion installées autour de la HP (partie haute pression).

A : Tubes de flammes

Sert à la fois pour refroidir les parois et pour diluer et mélanger l'écoulement de l'air dans (le foyer) la chambre à combustion.

B : Bougie d'allumage et détecteur de flamme

Sur quatre chambres sont installées des bougies pour amorcer l'allumage qui se transmet de proche en proche grâce à une tuyauterie d'interconnexion entre les chambres. Sur deux autres chambres sont installées généralement des détecteurs de flamme à ultraviolets.

3. Moteur de lancement (Diesel de secours)

Une telle turbine à gaz ne peut être démarrée par ses propres moyens, c'est pourquoi le dispositif de lancement est prévu en bout du rotor GG. Ce moteur entrainera le rotor du GG par l'intermédiaire d'un convertisseur de couple, d'un embrayage à fin d'alimenter le GG par un débit d'air suffisant pour l'explosion.

La combustion s'entretient d'elle-même et l'énergie fournie est de plus en plus importante dans la turbine HP. Le moteur de lancement participera à cette opération jusqu'à la phase d'autonomie de la machine. A ce moment le dispositif de lancement se débraye automatiquement.

4. Turbine de détente

Au sein de la turbine de détente a lieu la détente adiabatique des gaz brûlés dans la chambre de combustion. La turbine se compose de plusieurs étages de couronnes d'aubes distribuées par paire, entre le stator et l'arbre de la turbine, qui sont actionnés par le passage du flux de gaz de détente.

5. Partie turbine

• Turbine à haute-pression HP

La turbine à haute pression possède deux étages à écoulement axial, l'ensemble des deux disques (étages) sont montée à l'arrière de l'arbre du compresseur et porte les aubes en alliage réfractaire.

• Turbine à basse pression BP

Elle comprend deux étages à écoulement axial, chargé de transmettre la puissance utile à la machine accouplée à la turbine.

• La directrice (tuyère)

Se trouve entre la partie HP et BP. La directrice de deuxième étage comprend les cloisons (déflecteurs) formant une directrice à angle variable dans l'espace circulaire de la veine des gaz, juste à l'avant de la turbine du deuxième étage (voir la figure 16). Ces cloisons peuvent être déplacées en même temps grâce à des arbres saillant dans la caisse de la turbine à travers des douilles. Des leviers, fixés à l'extrémité des arbres, sont reliés par des maillons à des montants d'une bague de commande qui tourne sous l'action d'un cylindre hydraulique.



Figure 16: la tuyère (directrice) du 1^{er} étage.

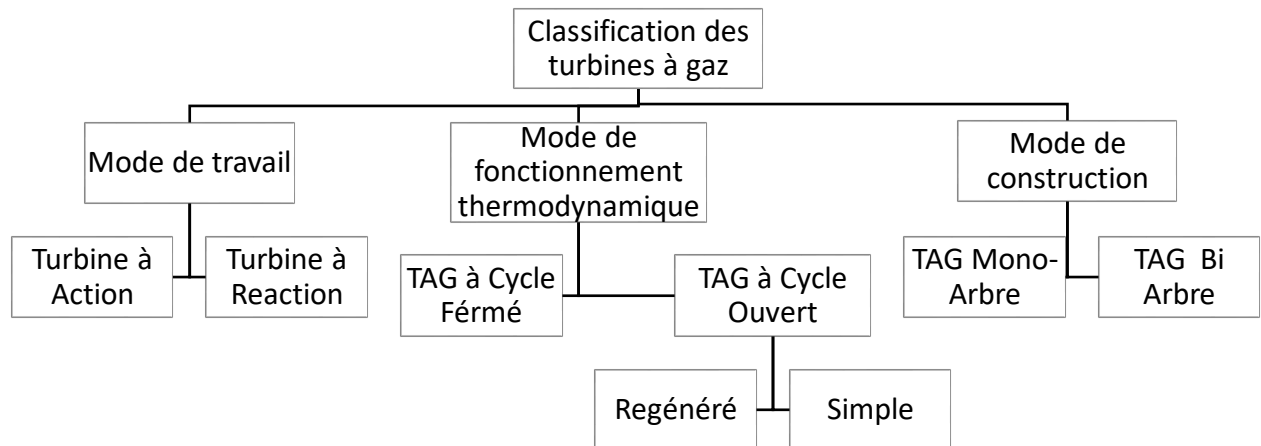
II.6 Classification des turbines à gaz

On peut classer les turbines selon différents points :[12]

- Par le mode de travail.

- Par le mode de fonctionnement thermodynamique.
- Par le mode de construction (voir le tableau 3).

Tableau 3: Classification des turbines à gaz.



II.6.1D'après le mode de travail

On distingue deux types

• Turbine à action

Le principe de fonctionnement d'une turbine, est que la transformation thermodynamique du fluide se fait uniquement dans la directrice (entre aubages fixes), désignés sous le nom de distributeur ou encore tuyère de détente, les aubes mobiles n'ont qu'un rôle à jouer, c'est de transformer l'énergie cinétique acquise par la détente en travail mécanique communiqué au rotor (voir la figure 17). L'évolution des gaz dans la roue se fait sans variation de pression $P_1 > P_2 = P_3$.

• Turbine à réaction

Dans les turbines à réaction, nous savons que la détente se fait aussi bien dans les canaux fixes que dans les canaux mobiles.

Une partie de l'énergie thermique est transformée dans la roue en énergie cinétique et mécanique.

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

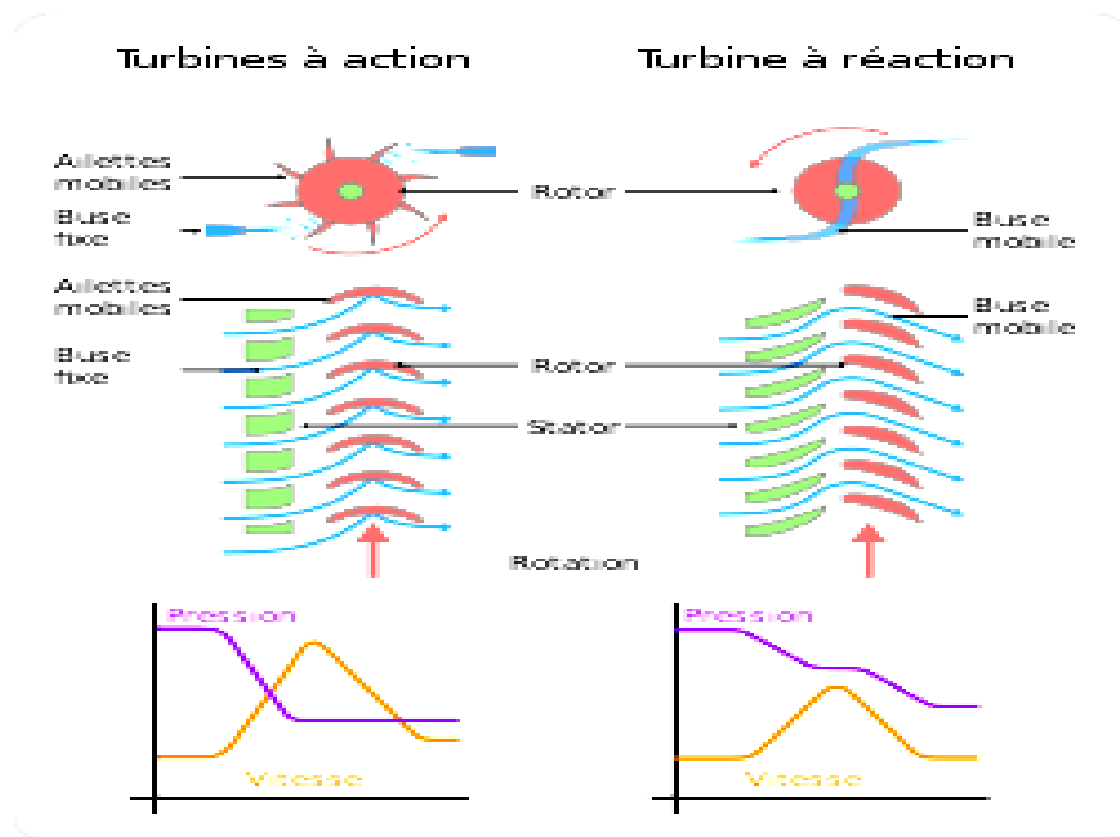


Figure 17: schéma d'une turbine à gaz à action et réaction.

II.6.2 Par le mode de construction

L'objectif pour lequel, on utilise la turbine à gaz définit le type qu'on doit choisir dans l'industrie. On trouve deux types : les turbines à un seul arbre et les turbines à deux arbres.

A) Turbine à un seul arbre (mono-arbre)

Elles sont généralement utilisées dans le cas où on cherche un fonctionnement avec une charge constante (pour entraîner les générateurs d'électricité) (voir la figure 18).

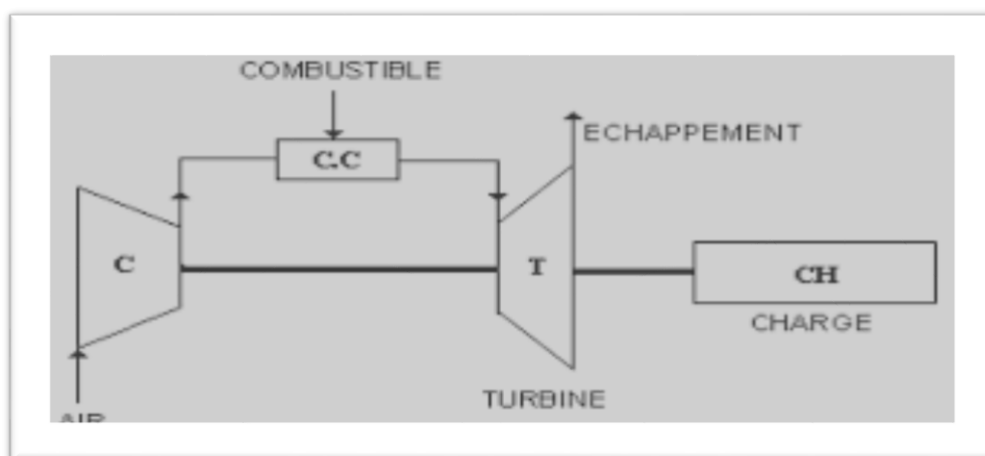


Figure 18: schéma d'une TAG mono arbre.

B) Turbine à deux arbres ou bi-arbres

Elles ont l'avantage d'entraîner des appareils à charge variables (pompes, compresseur,...). Elles se composent de deux parties la première assure l'autonomie de la turbine, et la deuxième est liée à la charge (voir la figure 19). Une turbine à gaz à deux arbres est généralement employée pour l'entraînement de charges mécaniques, par exemples un compresseur centrifuges.

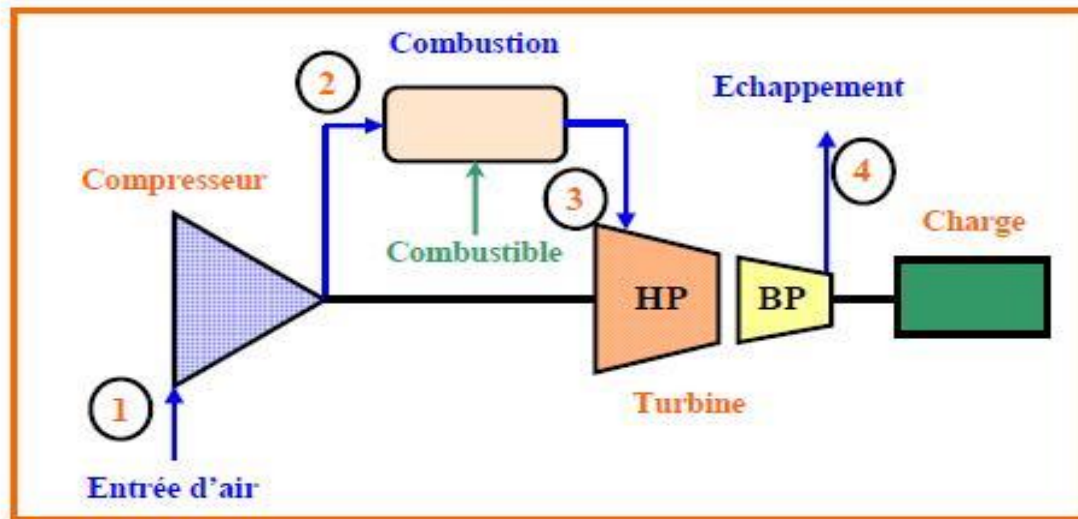


Figure 19: schéma d'une TAG bi-arbre.

II.6.3 Par le mode de fonctionnement thermodynamique

Il existe deux cycles thermodynamiques [11]

A) Turbine à gaz à cycle fermé

Dans laquelle le même fluide est repris après chaque cycle. La chambre de combustion est alors remplacée par un échangeur thermique qui transfère la chaleur d'une source chaude au fluide actif.

B) Turbine à gaz à cycle ouvert

C'est une turbine dont l'aspiration et l'échappement s'effectuent directement dans l'atmosphère.

II.7 Principe de fonctionnement de la turbine à gaz

Une turbine à gaz fonctionne en suivant les étapes (voir la figure 21).

- Admission:** Elle extrait de l'air du milieu environnant.
- Compression:** Elle le comprime à une pression plus élevée.
- Combustion:** Elle augmente les niveaux d'énergie de l'air comprimé en ajoutant et en brûlant le combustible dans une chambre de combustion (voir la figure 20).

•**Détente:** Elle achemine de l'air à pression et à température élevées vers la section de la turbine, qui convertit l'énergie mécanique pour faire tourner l'arbre ; Ceci sert, d'un côté, à fournir l'énergie utile à la machine conduite, couplée avec la machine au moyen d'un accouplement et de l'autre côté à fournir l'énergie nécessaire pour la compression relié directement à la section turbine.

•**Echappement:** Elle décharge à l'atmosphère les gaz à basse pression et température.

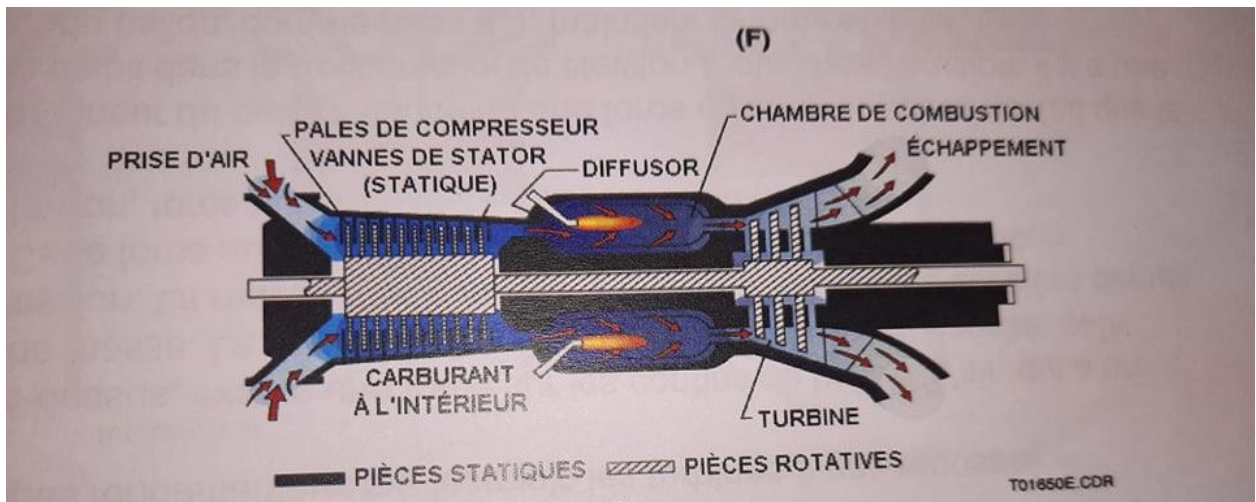


Figure 20: Système de fonctionnement de la TAG V94.3A [23]

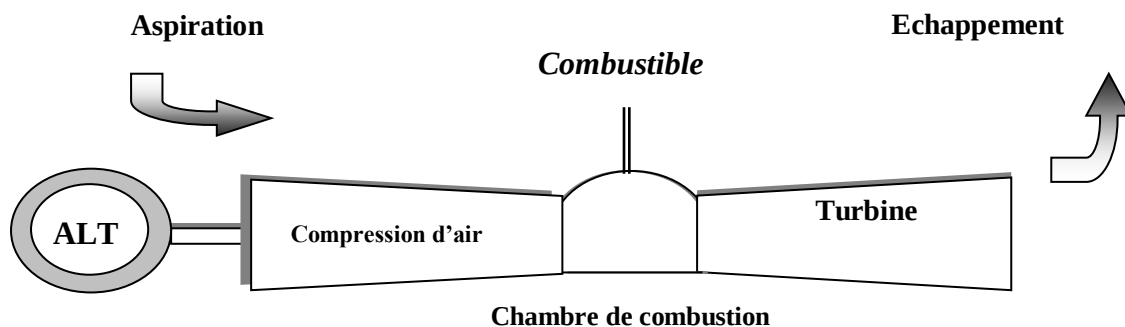


Figure 21: Schéma de principe de fonctionnement de la TAG.

II.8 Principales utilisation

Les turbines à gaz ont très répondu dans différents domaines d'applications, nous citerons : l'industrie des centrales électriques (nucléaires ou non nucléaires), transport par le propulsion.

Parmi ces domaines d'application

A) Aéronautique

•Turbocompresseur

Ce terme désigne une turbine actionnée par les gaz d'échappement d'un moteur à piston et dont le travail sert à comprimé l'air admis dans le moteur.

Le moteur turbocompressé combine donc un moteur à pistons et une turbine à gaz, les deux étant liés par une chambre de combustion commune (voir la figure 22). Il permet de concilier les avantages des deux types moteurs tout en réduisant leurs inconvénients respectifs, en particulier pour les cycles diesel. Ceci explique la généralisation actuelle de cette technique. Le problème majeur du turbocompresseur est le même que les autres turbine TAG, à savoir la gestion de la marche à faible charge ou en régime transitoire. Il est en grande partie résolu aujourd'hui dits 'à géométrie variable', munis d'aubages fixes à incidence variable

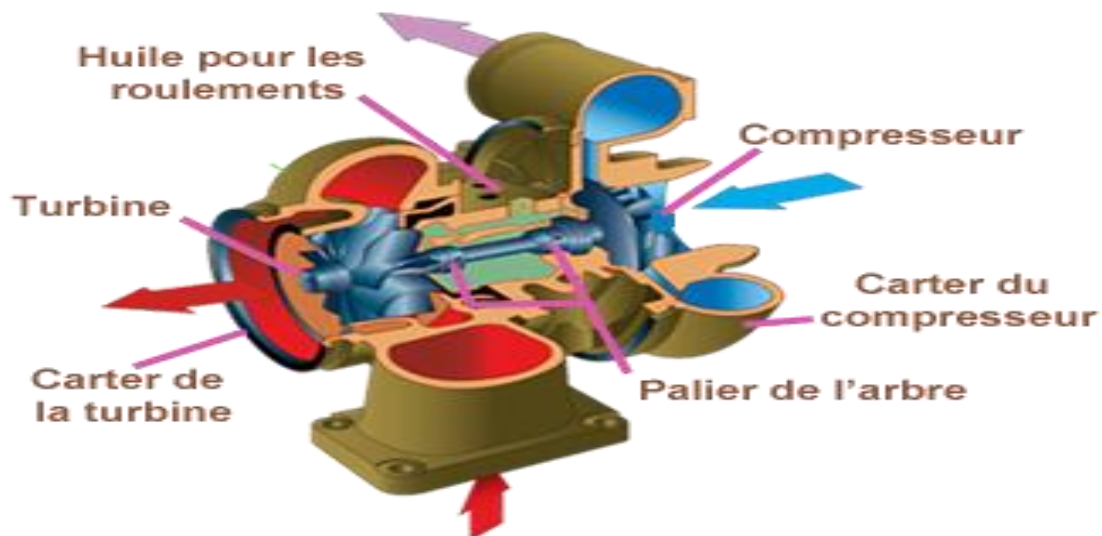


Figure 22: moteur turbocompressé.

•Turbine à gaz d'avion

Dans les moteurs d'avion, l'unité de turbine à gaz fonctionne entièrement comme générateur de gaz dans le turbo jet et les moteurs de turboréacteur, tandis qu'elle fournit la puissance exigée d'axes au propulseur dans le moteur de turbo propulseur (voir la figure 23).

La centrale de turbine à gaz utilisée pour la propulsion d'avion travaille sur le cycle de circuit ouvert de pression constante. Le choix d'un type particulier de dispositif de propulsion(ou moteur) dépend du type d'avion, sa gamme, sa vitesse de croisière et l'altitude.

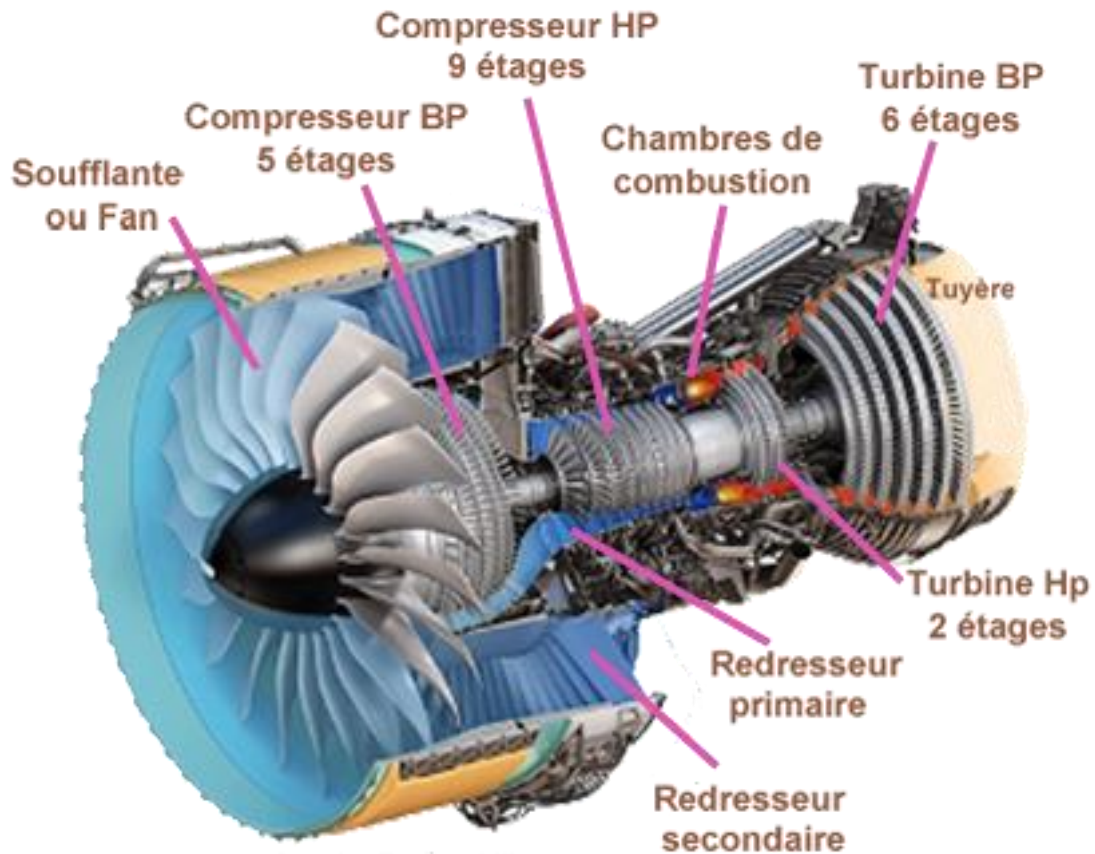


Figure 23: moteur d'avion dit turboréacteur.

•Moteur propulseur (turbopropulseur)

Les GTP, sont des turbomachines (générateur de gaz) couplée à une hélice tractive ou propulsive (voir la figure 24).

Dans le système de turbopropulseur la centrale de TAG conduit un propulseur à une vitesse raisonnable relativement basse par une vitesse de réduction. La turbine extrait une grande propulsion de l'énergie à partir des gaz chauds en développant la puissance requise pour conduire le propulseur.

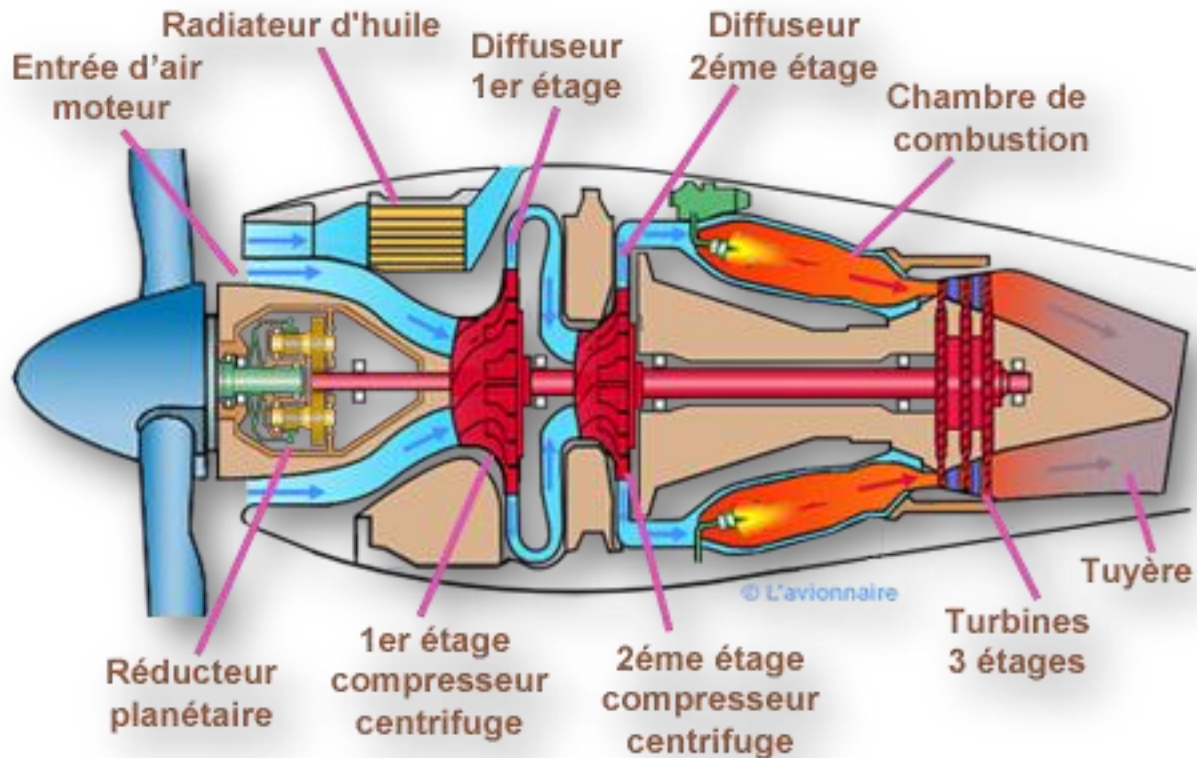


Figure 24: moteur turbopropulseur.

•Turboréacteur (turbo jet)

GTR (groupe turbo réacteur) simple flux utilise la réaction produite lors de l'échappement des gaz très chauds pour la propulsion de l'avion vers l'avant. En effet l'air pénètre dans le moteur à travers la prise d'air il est ensuite comprimé par un compresseur multi-étagé puis envoyé dans la chambre de combustion, les gaz chauds se dilatent en passant par la turbine et ils sont accélérés dans la tuyère.

•Moteur d'avion nucléaire

La chambre de combustion de moteur turbo jet conventionnel est remplacée ici par un échangeur de chaleur, ou s'effectue des transferts appropriés de la quantité de chaleur d'un liquide réfrigérant requise du réacteur à l'air. Le compresseur d'air est « entraîné par une turbine à air chaud qui fonctionne ici dans environnement moins hostile comparé aux turbines à gaz.

B) Centrale de cogénération

Une variante de la centrale à cycle combiné, est une installation qui comprend une turbine à gaz et une chaudière de récupération dont la vapeur peut également servir à un procédé industriel (voir la figure 25).

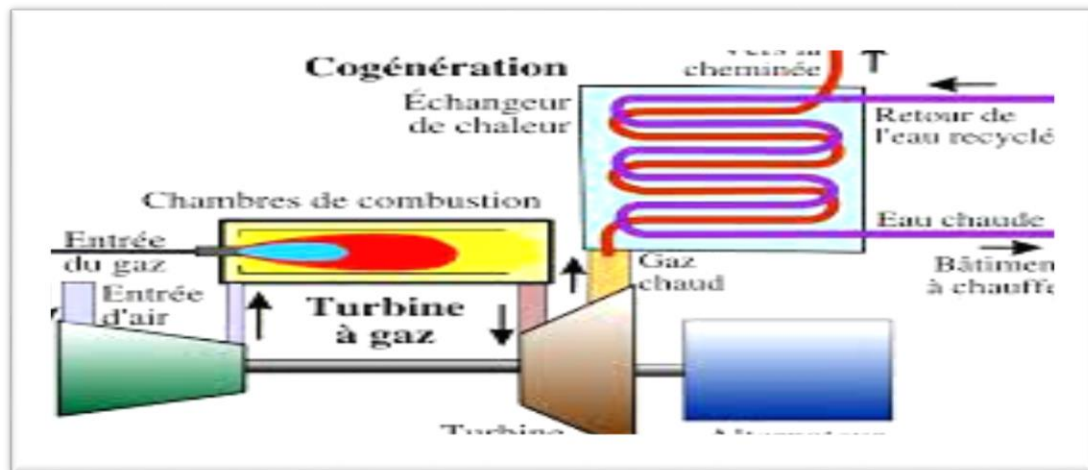


Figure 25: centrale de cogénération.

C) Production d'électricité

La turbine à gaz de grande puissance ($>1\text{MW}$) est surtout utilisée pour entraîner un alternateur et produire de l'électricité. Les infrastructures et le génie civil nécessaires pour une centrale électrique équipée de turbines à gaz sont réduits, ce qui permet d'installer en quelques mois une centrale tout près du lieu d'utilisation de l'électricité (ville, usine) ou de la source de combustible (port, forage raffinerie...). turbine et alternateur sont acheminés sous formes de modules compacts et complet qu'il suffit d'assembler et de raccorder aux réseaux dans des climats où la température extérieure peut aller de -40 à $+50^\circ\text{C}$. Un des avantages des centrales à turbine à gaz est le temps réduit pour la mise en œuvre, le gestionnaire d'un réseau de distribution électrique peut ainsi moduler facilement la capacité de production pour s'adapter aux variations de la consommation.

L'installation d'un groupe électrogène à turbine à gaz peut s'accompagner d'une installation en cogénération, afin de récupérer les quantités importantes d'énergie (environ 65% de l'énergie consommée) contenus dans les gaz éventuellement après passage dans un tunnel de post combustion, dans une chaudière de récupération, avec production d'eau chaude ou de vapeur.

II.9 Les avantages et inconvénients de la TAG

A) Avantage

- Une puissance élevée dans un espace restreint dans lequel un groupe diesel de même puissance ne pourrait être logé.
- À l'exception du démarrage et arrêt la puissance est produite d'une façon continue.
- Démarrage facile même à grand froid.

- Diversité de combustible pour le fonctionnement.
- Frais de première installations bas, pas de chaudière ni de condenseur.
- Mise en marche rapide.
- Refroidissement annexe inutile.

B) Inconvénients

- Difficulté d'obtenir des matériaux résistants aux hautes températures.
- Au dessous d'environ 3000 KW, le prix d'installation est supérieur de celui d'un groupe diesel.
- Temps de lancement, beaucoup plus long que celui d'un groupe diesel, à titre indicatif : 30 à 120 s pour une turbine, 8 à 20 s pour un groupe diesel.
- Rendement inférieur à celui d'un moteur diesel (cycle simple). A titre indicatif : 28 à 23% pour une turbine de 3000 KW, 32 à 38% pour un groupe diesel.
- Faible rendement en cycle simple (en moyenne 33%).
- Température à l'admission qui constitue une limite physique aux performances.

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les turbomachines d'une manière générale, puis nous sommes intéressées sur les turbines à gaz, en donnant une approche historique de leurs évolution, ainsi que leur classification selon divers critères, et enfin avantages et inconvénients sont illustrés.

Chapitre III :
Description de la
turbine V94.3A

III.1 Introduction

La centrale électrique d'EL HAMMA II d'Alger centre, est constitués de deux groupe turbine à gaz de type SIEMENS V94.3A, qui sont des machines à un seul arbre ayant une seule enveloppe. On peut utiliser ces turbines dans des cycles combiné et pour des applications de réchauffage de district.

Dans ce chapitre, nous présentons la turbine à gaz SIEMENS V94.3A on donnant ses caractéristiques technique de chaque constitutif. On concluant avec le système de fonctionnement.

III.2 Revue descriptive de la turbine SIEMENS V94.3A

La particularité de la construction de ce type de turbine à gaz compacte à une seule enveloppe est qu'elle est construite autour d'un rotor unique, celui-ci supportant aussi bien les aubages du compresseur d'une extrémité, et ceux de la turbine de détente de l'autre, et traverse la chambre de combustion annulaire axialement en son centre, celle-ci se trouvant alors comprise entre les deux différents groupes d'aubages (voir Annexe B).

L'enveloppe extérieure constitue la partie fixe de la machine (le stator) et maintient sous pression l'ensemble des organes de la turbine lors du fonctionnement. Elle se présente sous forme d'une partie inférieure, commune au compresseur et à la turbine et supportant les deux paliers de rotation et trois sections de fermeture (enveloppe compresseur, enveloppe chambre de combustion, porte aubes turbine), rapportées au support frontal et à l'enveloppe extérieure de la turbine par l'intermédiaire de boulons.

L'arbre de liaison représente quant à lui l'élément mobil de la machine (le rotor), il relie de manière rigide le compresseur à la turbine de détente et supporte aussi bien sur son axe les aubes mobiles du compresseur et de la turbine. IL se compose de trois sections d'arbre creux maintenues ensemble au moyen d'un tirant central et de disques et reçoit les aubes mobiles sous formes de couronne rapporté axialement.

III.3 Caractéristique technique de la turbine à gaz SIEMENS V94.3A

La turbine à gaz de type V94.3A de fabrication ANSALDO SIEMENS est de type industriel à un seul arbre (un seul rotor) et un seul corps avec une puissance minimale 209 MW (voir le tableau 4). Sont capable de faire fonctionner les générateurs dans les centrales. On peut utiliser ces turbines dans des cycles combiné ou simple.

Elles peuvent fonctionner avec des combustibles liquides, tels que les huiles combustibles légères, ou les combustibles gazeux ayant des valeurs spécifiques différentes, comme le gaz naturel ou le gaz de haut fourneau. [11]

Tableau 4:schéma de caractéristique technique de la TAG SIEMENS (voir l'annexe A)

Type	TAG V94.3A
Fournisseur	ANSALDO ENERGIE
Fabricant	SIEMENS
Puissance nominale (ISO)	232 MW
Puissance à 30°C	212.85 MW
Puissance à 40°C	199.7 MW

Poids	272 tonnes
Fréquence	50 HZ
Température des gaz d'échappement	571°C
Nombre d'étages	4
Consommation spécifique à 30°C	2.373kCal/ KWh
Consommation spécifique à 40°C	2.428kCal/kWh
Débit massique des gaz d'échappement	629 kg/s
Régime de fonctionnement	3000 tr/min
Poids du rotor avec les couronnes d'aubes	98 tonnes

III.4 caractéristique technique du Compresseur

Le compresseur volumétrique équipant la turbine SIEMENS V94.3A est de type axial à 17 étages de compression (voir la figure 26), et présente un taux de compression de l'air atmosphérique de l'ordre environ 16 pour 1 (voir le tableau 5).

Chaque étage de compression est formé par un couple d'aubages :

- Un aube rotorique, disposé une couronnes sur l'arbre.
- Un aube statorique, sur la face interne de l'enveloppe extérieure.

Le dispositif de protection contre le pompage dits également d'anti pompage, empêchent le compresseur de descendre trop bas en débit, lorsque la différence de pression entre l'entrée et la sortie d'un compresseur devient trop élevée, des instabilités que l'on appelle décollements apparaissent au niveau des aubes du compresseur. Le décrochage aérodynamique ne permet plus de pousser les gaz dans le bon sens, cette augmentation est limitée par ce phénomène de pompage pour assurer un fonctionnement stable du compresseur.

Les aubes statoriques permet d'acheminer ou diriger l'air aspiré vers la sortie du compresseur étage par étage qui accorde une pression élevée par les aubes rotorique, qui accélèrent son écoulement. Le pourcentage d'ouverture, des aubes mobiles varie selon la production d'électricité désiré c'est-à-dire, à force le pourcentage d'ouverture augmente, le volume d'air aspiré multiplie la pression, à l'aide d'un capteur de position angulaire. [10]



Figure 26: compresseur à 17 étages de la turbine V94.3A.

Tableau 5: caractéristique du compresseur.

Type	Axial
Nombre d'étage	17
Nombre d'étage d'aubes directrices à orientation variable (IGV)	1
Points de soutirage en aval de l'étage des aubes fixes.	5
Points de soutirage en aval de l'étage des aubes fixes.	10
Points de soutirage en aval de l'étage des aubes mobiles.	15
Taux de compression	≈16.1

III.5 Caractéristique technique de la Chambre de combustion

La turbine à gaz SIEMENS est dotée de vingt-quatre brûleurs hybrides répartis régulièrement sur le périmètre de la chambre de combustion annulaire (voir le tableau 6) afin d'assurer une zone de température homogène dans la chambre. Le cylindre de flamme est en deux parties et comprend une section moyeu (voir la figure 28), renfermant le rotor et dépourvue de joints, et une chemise de pression, traversée horizontalement par un joint d'enveloppe, et dans laquelle sont installés les brûleurs (voir la figure 29).

Ces brûleurs (brevet SIEMENS obtenu en 1986) permettent de réduire les émissions de NO par un procédé sec tout en maintenant les émissions de CO à un niveau minimale. Le combustible est brûlé pendant qu'il est mélangé à l'air carburant.

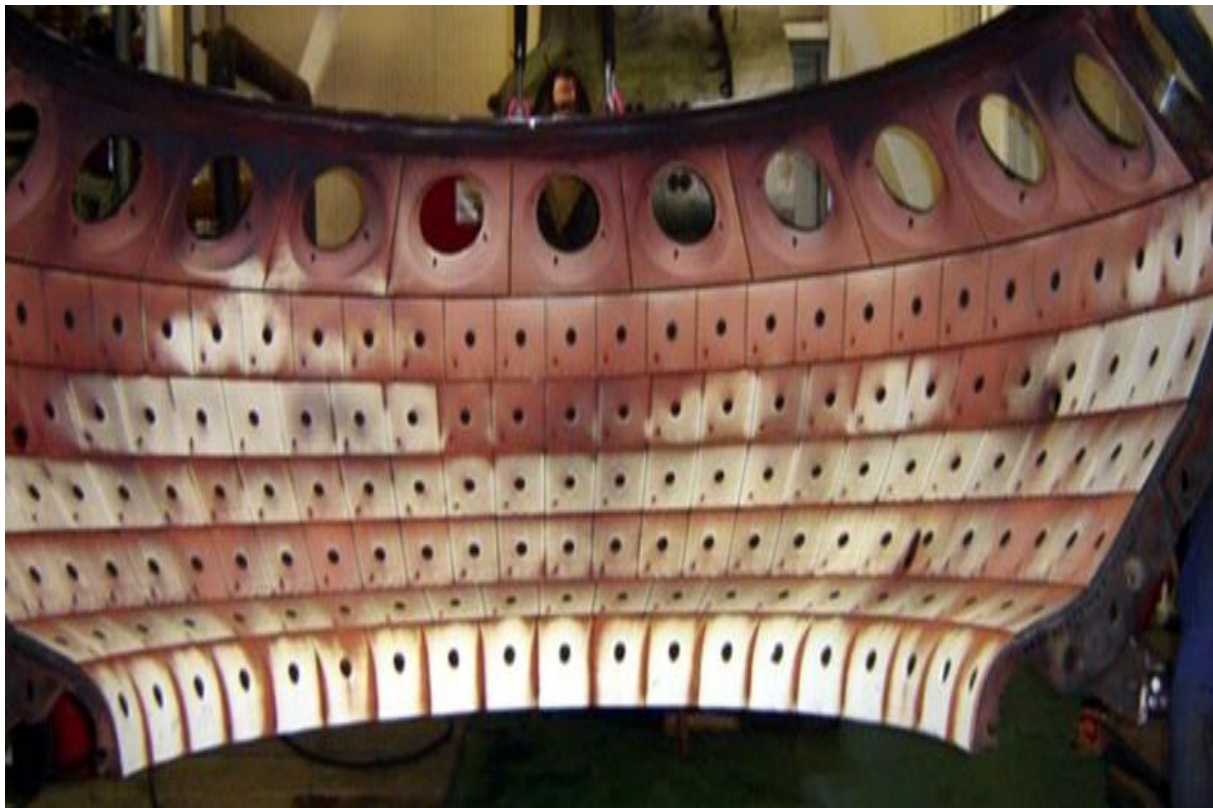


Figure 27: vue interne de la chambre de combustion de TAG V94.3A.

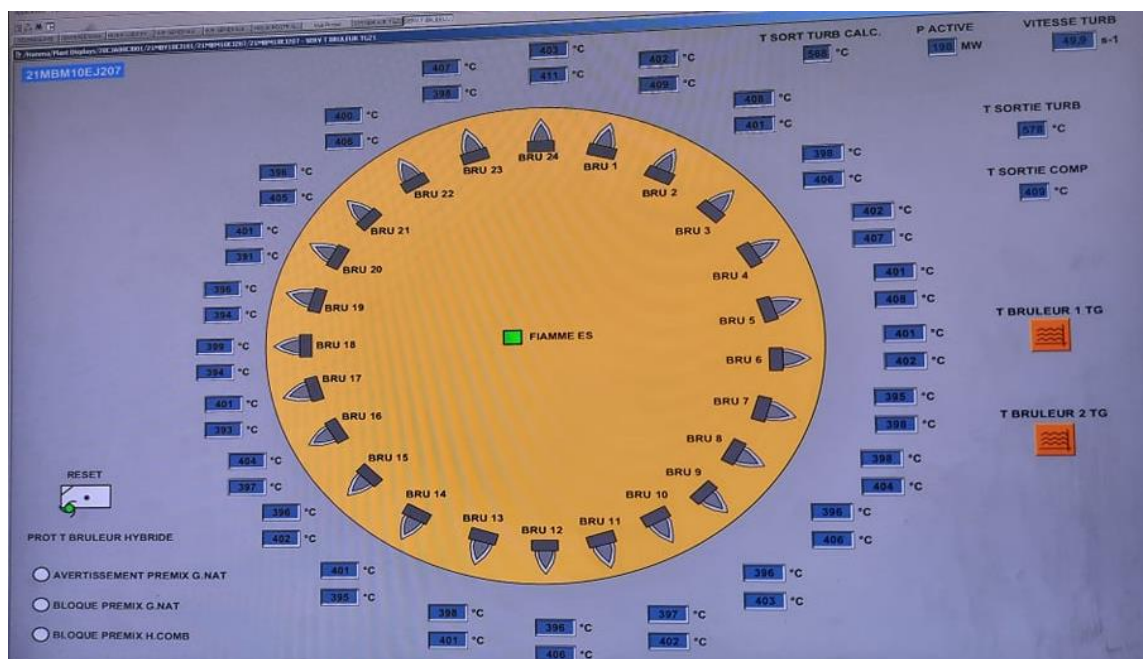


Figure 28: Schéma de positionnement des brûleurs sur la chambre de combustion.

• Les brûleurs hybrides SIEMENS

Les brûleurs hybrides sont de type hybride (breveté SIEMENS), fonctionnement à double combustible (gaz naturel, et liquide, fuel) (voir la figure 29). Ils sont repartis régulièrement sur le périmètre de la chambre de combustion afin d'assurer une zone de température homogène dans toute la chambre.

Les fonctions d'un brûleur ont pour but de :

- Permettre le réglage des débits air, gaz, pour obtenir de meilleures conditions de combustion telle que les conditions stœchiométriques.
- Réaliser le mélange de l'air et du gaz.

Donner à la flamme des dimensions appropriées à celle de l'enceinte où doit s'effectuer la combustion. [10]



Figure29: injecteur hybride fuel/gaz.

Tableau 6: schéma de caractéristique de la chambre de combustion.

Chambre de combustion

Type	annulaire
Débit de gaz d'échappement	629 kg/s
Nombre de dispositifs d'allumage des brûleurs	1
Nombre de transmetteurs de pulsations	8

Nombre de bruleurs	24
Volume de la chambre	5.32m ³

III.6 Caractéristique technique de La turbine de détente

Les gaz chauds issus de la chambre de combustion se détendent dans une turbine à quatre étages.

Chaque étage de la turbine est constitué d'une paire de couronnes d'aubes ; l'une statorique et l'autre rotorique (voir la figure 30), les aubes des trois premiers étages sont dotée d'un revêtement de protection contre la corrosion à hautes températures. [12]

Les gaz entrent aux travers des aubes avec une température très importante 1300°C et sortent de la turbine avec une température de 571°C et à une pression d'environ 1 bar, le débit des gaz d'échappement est d'environ 616.2 kg/s (voir le tableau 7).

Les quatre étages d'aubes fixes et les trois premiers étages d'aubes mobiles sont refroidis à l'air.

L'air de refroidissement destiné à la turbine est prélevé aux étages appropriés du compresseur. Les aubes sont refroidies par film, par impact ou par convection, selon les étages de la turbine, pour garantir la fiabilité et le fonctionnement optimale de la turbine.

Chaque étage de la turbine est refroidit comme suit :

Etage1: air soutiré de l'échappement du compresseur.

Etage2: air soutiré du 15^{ème} étage du compresseur pour les aubes fixes, et en aval du 14^{ème} étage pour les aubes mobiles.

Etage3: air soutiré du 10^{ème} étage du compresseur pour les aubes fixes et en aval du 14^{ème} étage pour les aubes mobiles.

Etage4 : air soutiré du 5^{ème} étage pour les aubes fixes et du 14^{ème} étage pour les aubes mobiles.



Figure 30: Etages d'aubes de la turbine V94.3A.

Tableau 7: schéma de caractéristique de la turbine.

Turbine

Nombre d'étages de détente	4
Débit massique de gaz d'échappement	616.2 kg/s
Température de gaz d'échappement	571°C
Puissance nominale	209 MW

III.7 Condition du site

Tableau 8: schéma de caractéristique du site.

Température extérieure minimale	-10°C
Température extérieure maximale	+50°C
Température moyenne	+25 °c
Taux d'humidité	70% à 80%
Pression atmosphérique	1.01325 bar

III.8 Système d'aspiration d'air et filtration

Le système d'aspiration fournit de l'air filtre au compresseur de la turbine à gaz, en quantité et en qualité nécessaire au fonctionnement de cette dernière dans les conditions ambiantes locales, l'air à l'entrée pénètre la chambre de filtration, puis il transperce le dispositif silencieux (voir la figure 31), le coude, la conduite verticale jusqu'à son arrivée à l'admission du compresseur.

Un dispositif de filtration comprend un capot, un écran anti-oiseaux (voir le tableau 9), un séparateur d'humidité, un séparateur à inertie (voir la figure 32), un pré-filtre et un filtre à haute efficacité, qui sont constitués d'éléments filtrants qui doivent être remplacés du fait de l'encrassement. Un lavage à terme s'avère donc nécessaire avec de l'eau distillée, donc l'entrée d'un corps peuvent provoquer une baisse de puissance de sortie, augmenter les couts du carburant et endommager des composants essentiels (risques de corrosion pour la turbine et risque d'érosion, modification du profil des aubes du compresseur).

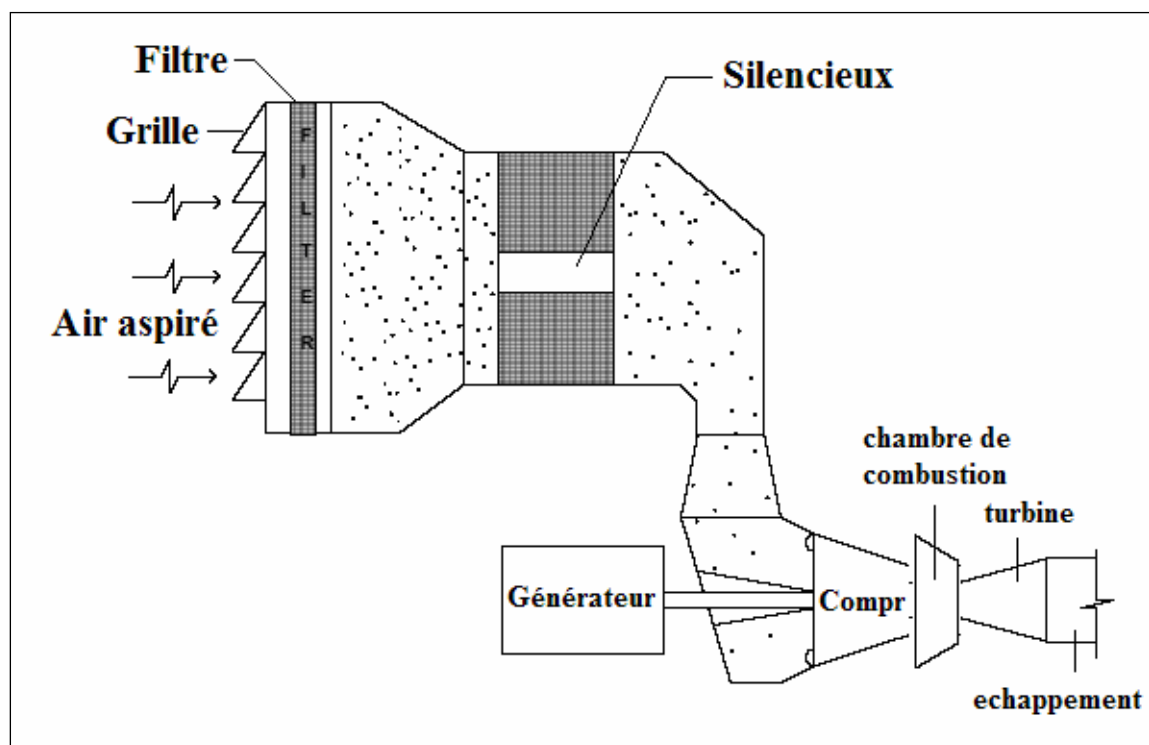


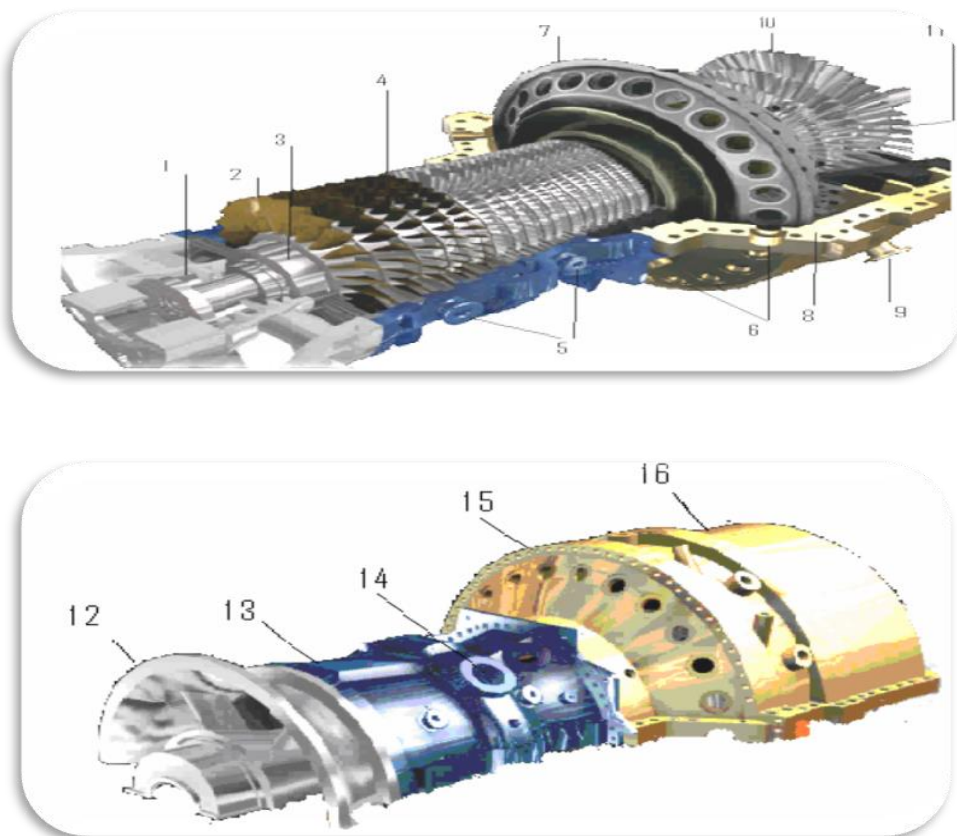
Figure 31: coupe du système de prise d'air.



Figure32: vue externe du système d'aspiration d'air et de filtration.

Tableau 9: caractéristique technique du système d'air.

Caractéristiques nominal	
Débit volume d'admission (au condition ISO)	505 m ³ /s
Température	30°C
Humidité relative moyenne	75%
Vitesse maximale du vent	45m/s
Nombre pré filtre/ filtre à haute efficacité	505 pièces
Perte de charge finale dans tout le système	1000 Pa
Matériaux	
Silencieux	Laine minérale de haute qualité
Graine	Acier a base de carbone
Caisson des filtres	Acier a base de carbone
Ecran anti oiseaux	Acier inoxydable
Capot	Acier à base de Carbone au Al Mg



- | | |
|--|---|
| 1-Palier combiné porteur et de butée | 9- Entrée d'air compressé à la turbine |
| 2-Revêtements de 5 étages de compresseur | 10- Aubage turbine |
| 3- Rotor | 11-Palier porteur |
| 4-Aubage compresseur | 12-Gaine d'aspiration (diffuseur) |
| 5-Canal d'air de soutirage | 13-Enveloppe de compresseur |
| 6- Ensemble e brûleurs | 14-Soutirage d'entrée pompage |
| 7- Chambre de combustion | 15-Enveloppe de chambre de combustion |
| 8- Enveloppe inférieure | 16- Porte aube stationnaire de turbine. |

Figure 28: Vue en éclatée de la turbine SIEMENS V94.3A.

Tableau 10: Dimensions et poids de la turbine à gaz V94.3A.

N	Composant $\pm 5\%$	Poids en Kg	Dimension (mm)
		(approx)	$L \times W \times H$
1	Coffrage palier compresseur, section supérieur	4000	1100 × 6000 × 1800
	Coffrage palier compresseur, section inférieur	4000	1100 × 6000 × 1800

2	Unité aubage stationnaire compresseur1 et dispositif de changement de pas, section supérieur	18000	3100 × 2100 × 1600
	Unité aubage stationnaire compresseur1 et dispositif de changement de pas, section supérieur	18000	3100 × 2100 × 1600
3	Unité aubage stationnaire compresseur2, section supérieur (y compris registre de sortie)	4150	1100 × 2650 × 1300
	Unité aubage stationnaire compresseur2, section inférieur (y compris registre de sortie)	4150	1100 × 2650 × 1300
4	Coffrage 2, section supérieur	1000	1350 × 5100 × 2400
	Coffrage2, section inférieur	1000	1350 × 5100 × 2400
5	Bruleurs (24 pour chaque machine)	2000	2000 × 3000 × 1000
6	Coffrage 3, section supérieur	21500	3000 × 5100 × 2400
	Coffrage 3, section inférieur	21500	3000 × 5100 × 2400
7	Coquille extérieur chambre de la combustion, section supérieur	4000	1250 × Ø4100
	Coquille extérieur chambre de la combustion, section inférieur	4000	1250 × Ø4100
8	Coffrage arbre	12000	2000 × Ø3100
9	Rotor	71000	10500 × Ø3300
10	Unité aubage stationnaire turbine, section supérieur	13750	1700 × Ø4000
	Unité aubage stationnaire turbine, section inférieur	13750	1700 × Ø4000
11	Coffrage palier turbine et revêtement coffrage	15000	2000 × Ø4200
12	Compresseur/ turbine	272000	10500 × 510 ×
	Plus un poids éventuel de tolérance de 5%		4800

III.9 L'alternateur

La production de l'énergie électrique est réalisée par un alternateur d'une puissance de 270 MVA et de 15,5 KV de tension, par groupe (voir le tableau 11).

La puissance délivrée par l'alternateur est transmise au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur élévateur d'une puissance de 260 MVA et de 15,75/220 KV de tension

l'entraînement de l'alternateur est assuré par un convertisseur de démarrage statique (voir la figure 34). Le refroidissement de l'alternateur à partir des tuyauteries d'eau (voir annexe C).

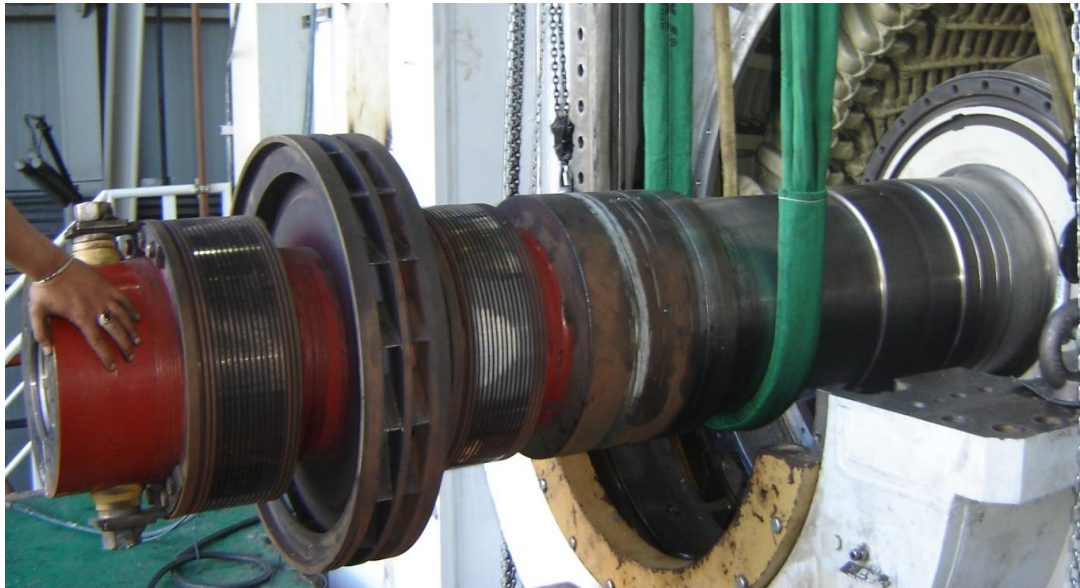


Figure34: alternateur 50 THR (photo prise pendant la maintenance majeure 2020).

Tableau 11: caractéristique technique de l'alternateur.

Type	50 THR-L45
Puissance nominale	270 MVA
Alimentation des auxiliaires par soutirage	MT
Tension sortie d'alternateur	15.75 KV
Refroidissement	Hydrogène
Poids	215 tonnes

❖ Les composants de l'alternateur

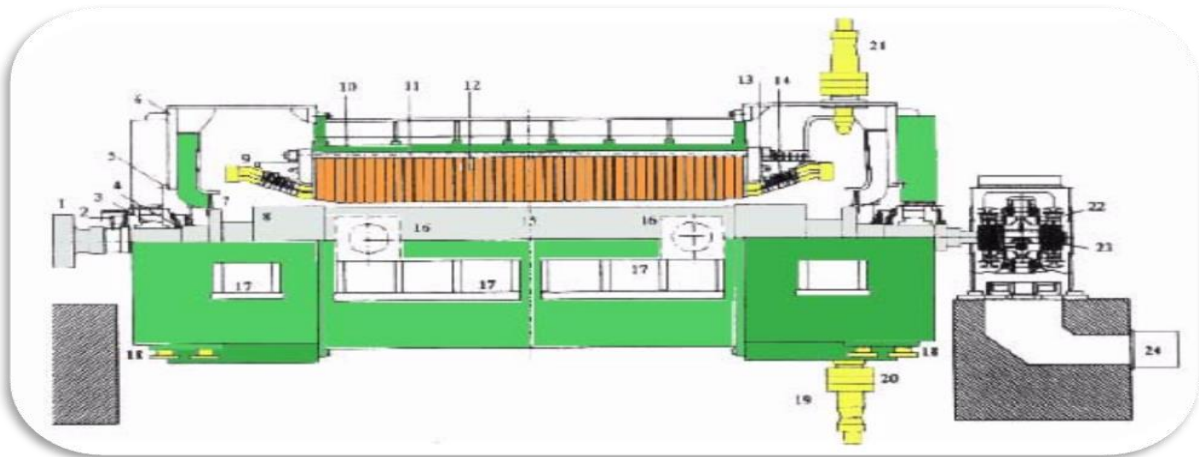


Figure35: Eléments constitutifs de l'alternateur.

1- Bride d'accouplement	9-Têtes enroulement stator	17-Pieds d'appui
2-Mise à masse de l'arbre	10- Montage élastique du noyau	18-Réfrigérants hydrogène
3-Palier	11-Tirants du paquet	19-Traversées inférieures
4-Etanchéité hydrogène	12-Noyau magnétique	20-Transformateurs de courant
5-Flasque palier	13-Plateau de serrage noyau	21-Traversées supérieurs
6- Carcasse	14-Support têtes stator	22-Balais
7- Ventilateurs	15- Corps rotor	23-Bagues collectrices
8-Frette de blindage	16-Tourillons	24-Filtre air chambre bagues

III.10 Le Transformateur

Le transformateur est une machine statique à induction servant à transformer un système de courant alternative en un autre système d'intensités et de tensions différentes (voir la figure 36).

❖ **Fonctionnement**

Le principe de fonctionnement des transformateurs se base sur l'emploi de plusieurs bobines sur un même circuit magnétique. Lorsque les bornes primaires, sont reliées à une source de courant alternative, elles créent dans le noyau du circuit magnétique un flux

alternatif dont les variations provoquent dans les bobines secondaires une force électromotrice d'induction alternative de même fréquence que celle du courant d'alimentation.



Figure 36: Transformateur principal.

III.11 Diesel de secours

Le Groupe Diesel est constitué de trois parties essentielles (voir le tableau 12) :

- ✓ moteur thermique équipé des systèmes mécaniques nécessaires.
- ✓ Un compresseur d'air.
- ✓ Le système de commande et de protection (voir la figure 37)

Tableau 12: caractéristique technique de groupe diesel.

Diesel de secours

Puissance active nominale	4114 KW
Puissance apparente nominale	6050 KVA
Vitesse nominale	1000 tr /mn
Fréquence	50 Hz
Courant	582.2 A
Phases	3



Figure37: Groupe diesel.

III.12 Système de gaz naturel

Ce système a comme but l'alimentation de la centrale en gaz naturel. C'est le système d'alimentation principal utilisé dans cette centrale.

La ligne de l'alimentation gaz naturel se divise dans des lignes secondaires : diffusion, pilote et pré mixage (voir la figure 38). Les soupapes de contrôle sont positionnées sur l'installation gaz naturel juste en aval des ces divisions. Ces lignes vont directement vers les différents brûleurs de la chambre de combustion. Ce système fonctionne selon trois modes, toutes en détectant la température d'échappement avec vingt-quatre thermocouples placés dans l'échappement avec une pression d'entrée gaz de 46 à 71 bars (voir annexe D).

Tableau 13: caractéristiques technique du poste gaz.

poste gaz

Constructeur	NuovoPignone
Pression entrée gaz	46-71 Bars
Pression détente gaz	29-32 Bars
Consommation gaz	120 000Nm³/h



Figure38 : Positionnement du poste gaz de la centrale du Hamma II.

Le gaz naturel est délivré à la centrale au moyen d'un gazoduc. Il passe par le poste gaz pour aboutir au séparateur dans lequel seront éliminés tous les condensats contenus dans ce gaz.

Les condensats seront alors conduits automatiquement dans un réservoir de récupération.

Le gaz traverse ensuite les filtres (voir le tableau 14) à cartouches dotées d'un dispositif de séparation magnétique des particules métalliques afin de protéger les régulateurs et le système d'alimentation turbine de ces dernières.

Un comptage statique permet de comptabiliser le débit de gaz consommé par la chaudière du réchauffeur et les groupes turbines à gaz.

Afin d'éviter le givrage du gaz après détente, le réchauffage du combustible est assuré par deux réchauffeurs de type « bain marie » fonctionnant, l'un en mode normal, et l'autre en mode secours, et permettant, chacun, l'alimentation à 100 % du débit des deux groupes.

Le poste de détente sera composé de quatre lignes, chacune de 50 % du débit de la ligne principale. Les quatre lignes sont réglées pour fonctionner avec des pressions en cascade. Deux lignes assurent le fonctionnement normal et deux autres assurent le secours automatique.

La fonction de tout ce système du gaz naturel est d'alimenter les deux turbines à gaz V94.3A avec du gaz à la pression et débit demandés, débarrassé des particules liquides et solides.

III.13 Système gasoil

Le système huile combustible (gasoil) est un système de secours, il fournit l'huile combustible aux brûleurs et contrôle le volume de combustible injecté dans la chambre de combustion à l'aide des pompes (voir la figure 39). Au cours de l'arrêt, il arrête de manière stable fiable le débit d'huile combustible.

Ce système aussi a comme but d'alimenter la centrale mais avec de l'huile combustible la ligne d'alimentation du gasoil se divise en trois lignes secondaires : diffusion, pré mixte et retour de gasoil.

Comme le système gaz combustible, le système de l'huile combustible alimente les centrales (les deux groupes) selon deux modes :

- **Mode diffusion**

Quand la température d'échappement est inférieure à 430°C, la soupape de la ligne diffusion s'ouvre.

- **Mode pré mixte**

Quand la température d'échappement mesurée par les thermocouples est supérieur à 480°C, la soupape de la ligne pré mixte s'ouvre (la soupape de la ligne diffusion reste ouverte).

Tableau 14: caractéristique du système gasoil.

Système gasoil

Type et nombre de filtres à huile	1 duplex
Type de pompe d'injection	Centrifuge
Nombre de pompes d'injection	1



Figure 299: Pompe centrifuge d'injection.

III.14 Système à air comprimé

Le système d'air comprimé commun aux deux turbines à gaz est composé de deux compresseurs pour fournir l'air nécessaire, soit pour les utilisateurs des services, que pour les exigences des instruments ; ils alimentent un réservoir principal.

En aval du réservoir principal sont pourvus deux systèmes séparés l'un de régulation et l'autre pour l'air de travail.

Le système d'air comprimé est connecté aux systèmes suivants :

- ✓ Réservoir de stockage de l'atelier
- ✓ Système du gasoil
- ✓ Système H₂-CO₂ de l'alternateur (requête d'air pour pousser dehors le CO₂ pendant l'opération de l'entretien de l'alternateur)

L'air comprimé utilisé par les commandes pneumatiques (soupapes de purge, soupape CO₂) est fourni par une station pneumatique. Qui comprend essentiellement deux sous-systèmes à compresseurs identiques. La capacité de chaque sous-système est suffisante à fournir une alimentation fiable d'air comprimé à la turbine à gaz.

L'air est comprimé à l'aide d'un compresseur électrique à double piston et séché, puis refroidi jusqu'au point de rosée de +2°C, le système intérieur de séparation élimine les gouttes d'eau de condensation de même que les impuretés solides du flux d'air comprimé, Le liquide

condensé est drainé dans le réservoir de collectage de drainage moyennant un robinet de drainage intégré dans chaque sous-système compresseur. L'air sort du sécheur est sec et 8°C environ en dessous de la température d'entrée.

Le système électrique fournit une continuité maximum du service et aussi pour assurer le fonctionnement de l'équipement essentiel de la station en condition d'urgence.

Il assure aussi la liaison entre les groupes générateurs et le réseau de distribution.

Ce système consiste essentiellement en :

- ✓ Deux transformateurs élévateurs de tension de puissance nominale ajustable.
- ✓ Des arrivées de l'alternateur en gaines coaxiales comportant des disjoncteurs et sectionneurs de coupure.
- ✓ Des départs comportant également des disjoncteurs et des sectionneurs.

III.15 Le système de commande

Comprend tout l'équipement de commande indispensable au démarrage, au fonctionnement normal et à l'arrêt de sécurité des turbines à gaz et des systèmes auxiliaires de là (voir l'annexe E).

➤ Salle de commande

C'est le cerveau de la centrale, car au niveau de ce point centralisé sont disponibles toutes les commandes, les indications et les informations qui doivent favoriser :

- ✓ La surveillance des états et paramètres.
- ✓ La rapidité et la sécurité des actions.
- ✓ La détection des anomalies.
- ✓ L'élimination des défauts.
- ✓ L'optimisation des réglages.

III.16 Caractéristique technique du Système d'échappement

Le système réalisé est d'une forme cylindrique avec des solutions de réduction de bruit passive et/ou réactive.

A) Domaines d'application

Réduction de l'impact sonore de centrales de production d'énergie décentralisées et de centrales électriques de grande capacité.

B) Description

Ce système comprend quatre ensembles principaux :

- La partie inférieure de la cheminée.
- La partie supérieure de la cheminée.

- Le diffuseur abritant le silencieux.
- Le cadre de support

➤ **Un diffuseur**

Il absorbe les dilatations thermiques par son joint qui est installé entre la sortie de la turbine et l'entrée du diffuseur, on retrouve aussi des thermocouples qui permettent l'évaluation de la température d'échappement (voir la figure 40).

➤ **Une cheminée**

Elle est constituée de trois parties : partie inférieure, partie supérieure et le cadre de supportage.



Figure 40 : système d'échappement (diffuseur + cheminée).

Tableau 15: Caractéristique techniques du système d'échappement.**Système d'échappement**

Débit- volume d'admission (aux conditions ISO)	1490 m³/s
Pression max. (partie supérieure de la cheminée)	1000 Pa
Plage de température ambiante	-1 à 40°C
Gaine	Acier à base de carbone
Calorifuge	Laine céramique
Couverture	Acier inoxydable

III.17 Fonctionnement de la centrale

Dès que le système de démarrage de la turbine est activé et que l'embrayage est engagé, l'air ambiant est aspiré, filtré puis comprimé dans les 17 étages du compresseur axial. Pour Empêcher le pompage du compresseur au démarrage, des vannes anti-pompage d'extraction d'air sont ouvertes et les aubes orientables (I.G.V) situées à l'entrée du compresseur sont en position "fermée".

A la vitesse de rotation nominale, les vannes anti-pompage commencent à se fermer automatiquement tandis que les aubes orientables (I.G.V) reviennent à leur position normale de fonctionnement et se sont déjà légèrement ouvertes pour atteindre un angle intermédiaire. L'air comprimé en provenance du compresseur pénètre dans l'espace annulaire constituant la chambre de combustion, au même moment les injecteurs introduisent le combustible dans la chambre de combustion où il se mélange à l'air. L'allumage s'effectue grâce à deux bougies rétractables.

Les gaz chauds issus de la chambre de combustion traversent ensuite les quatre Étages de la turbine où ils se détendent. Chaque étage se compose d'un ensemble d'aubes fixes Suivies d'une rangée d'aubes mobiles. Dans chaque rangée d'aubes fixes, l'énergie cinétique du jet de gaz augmente, en même temps que la pression chute, une partie de l'énergie cinétique du jet

est convertie en travail utile transmis au rotor de la turbine sous la forme d'un couple mécanique.

Après leur passage dans les aubes du quatrième étage, les gaz d'échappement traversent le diffuseur.

La rotation résultante de l'arbre entraîne le rotor de l'alternateur et certains auxiliaires.

III.18 Conclusion

Un dimensionnement et une description bien détaillée de la TAG SIEMENS V94.3A a été décrite au long de ce chapitre. Toutes les parties constituant avec leurs caractéristiques techniques ont été présentées. Enfin une étude sur les systèmes mécaniques principaux a été abordée.

Chapitre IV : Cycle thermodynamique

IV.1 Introduction

Le cycle de fonctionnement d'une turbine à gaz peut être divisé en trois phases.

La première phase est la compression de l'air puisé dans l'atmosphère, la seconde correspond à l'apport de chaleur dans la chambre de combustion. Cet apport énergétique se fait par une combustion d'un mélange constitué de l'air comprimé et d'un combustible qui peut être du gaz naturel, du fuel lourd. La troisième phase est constituée par la détente dans la turbine du gaz brûlé. Le cycle thermodynamique qui représente bien le fonctionnement des turbines à gaz est le cycle de Brayton.

Le but de cette étude est de déterminer les paramètres et les performances de la turbine à gaz SIEMENS V94.3A, et une estimation de l'énergie perdue à l'échappement est en se basant sur les données du constructeur et les conditions standards du site.

IV.2 Rappels théoriques

Les formules et notions théoriques rappelées ci-après sont celles strictement aux calculs des cycles et performances des turbines à gaz.

✓ Enthalpie totale

Par définition :

$$h_{tot} = h + \frac{c^2}{2} \text{(Energie potentielle négligée)} \dots\dots\dots (1)$$

✓ Premier Principe de la thermodynamique

Appliqué aux turbines à gaz, il s'écrit entre l'entrée (1) et la sortie (2) du fluide :

$$W + Q = \Delta h = h_2 - h_1 \dots\dots\dots (2)$$

En écoulement adiabatique ($Q = 0$), cette relation devient :

Soit :

$$W = \Delta h = h_2 - h_1 \dots\dots\dots (3)$$

✓ Pour un compresseur :

$$W_c = \Delta h = h_2 - h_1 > 0 \dots\dots\dots (4)$$

✓ Pour une turbine :

$$W_{eT} = \Delta h = h_2 - h_1 > 0 \dots\dots\dots (5)$$

Quantité de chaleur [Q]

La quantité de chaleur ou d'énergie de chaleur échangée **Q₁₂** (cédée ou fournit) en Joule (J) ou en Calorie (Cal), entre un système thermodynamique et le milieu extérieur, pendant une transformation d'un état thermodynamique initial 1 à un état thermodynamique final 2 est donnée par la relation générale :

$$Q_{1,2} = m \cdot C_x \cdot (T_2 - T_1) \dots\dots\dots (6)$$

Où :

m = masse totale du fluide

T₁ = température du fluide thermodynamique à l'état thermodynamique initial 1

T₂ = température du fluide thermodynamique à l'état thermodynamique final 2

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

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

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

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

$C_x = 0$: pour un processus adiabatique (pas d'échange avec le milieu extérieur) et isentropique

Lorsque le processus est en plus réversible.

La quantité de chaleur ou d'énergie de chaleur correspondante par unité de masse Q_{1-2} , Dite

Massique ou spécifique (en J/Kg ou Cal/Kg) est donnée par la relation générale

$$Q_{1-2} = C_x \cdot (T_2 - T_1) \dots \dots \dots (7)$$

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

✓ Quantité de travail [W]

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

$$W_{1-2} = \int_1^2 p dv \dots \dots \dots (8)$$

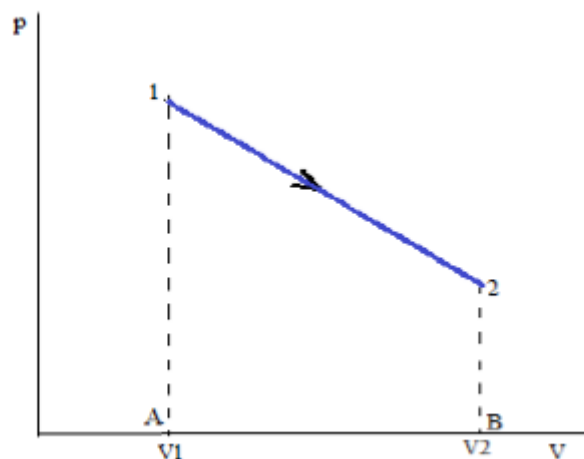


Figure 41 : Transformation 1-2 sur le diagramme P-V (de Clapeyron).

Cette quantité de travail est représentée sur le diagramme P-V (de Clapeyron) de la figure par la surface 1-2-B-A limitée par la transformation 1-2 et le segment A-B (V_1-V_2).

✓ **Energie interne [U]**

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

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \dots\dots\dots (9)$$

$$\Delta U_{1-2} = U_2 - U_1 = Q_{1-2} + W_{1-2} = -\int_1^2 p dv \dots\dots\dots (10)$$

Avec :

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

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

$W_{1-2} = -\int_1^2 P dV$ = quantité de de travail échangées pendant cette transformation et dont l'expression dépend du type de celle-ci. Les équations par unité de masse donnent :

$$\Delta u = \Delta q + \Delta w$$

Ou :

$$\Delta U_{1-2} = U_2 - U_1 = q_{1-2} + W_{1-2} = -\int_1^2 P dV \dots\dots\dots (11)$$

✓ **Enthalpie [H]**

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

$$H = U + PV \dots\dots\dots (12)$$

Soit pour la variation d'enthalpie :

$$\Delta H = \Delta U + \Delta (P \cdot V) \dots\dots\dots (13)$$

Les équations sous forme massique deviennent respectivement

$$h = u + P \cdot v \dots\dots\dots (14)$$

$$\Delta h = \Delta u + \Delta (p \cdot v)$$

✓ **Entropie[S]**

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

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \dots\dots\dots (15)$$

Qui donne :

$$\Delta S_{1-2} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \dots\dots\dots (16)$$

Ou sous forme massique :

$$\Delta S_{1-2} = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T} \dots\dots\dots (17)$$

Pour une transformation isotherme ($T=\text{cts}$) :

$$\Delta S_{1-2} = S_2 - S_1 = \frac{Q_{1-2}}{T} \dots\dots\dots (18)$$

IV.3 Etude du cycle simple d'une turbine à gaz

La turbine à combustion interne, que l'on appelle d'une façon plus métonymique turbine à gaz est une machine motrice comprenant un turbocompresseur C, une chambre de combustion CC et une turbine T assemblés selon le schéma de la Figure 42. Le compresseur aspire de l'air atmosphérique à l'état 1 et le comprime, ensuite il rentre à l'état 2 dans la chambre de combustion dans laquelle on injecte simultanément un combustible liquide ou gazeux. La combustion s'effectue sous pression approximativement constante et produit des gaz à haute température (état 3), qui sont ensuite étendus avec production de travail moteur dans la turbine, jusqu'à la pression atmosphérique (état 4). [13]

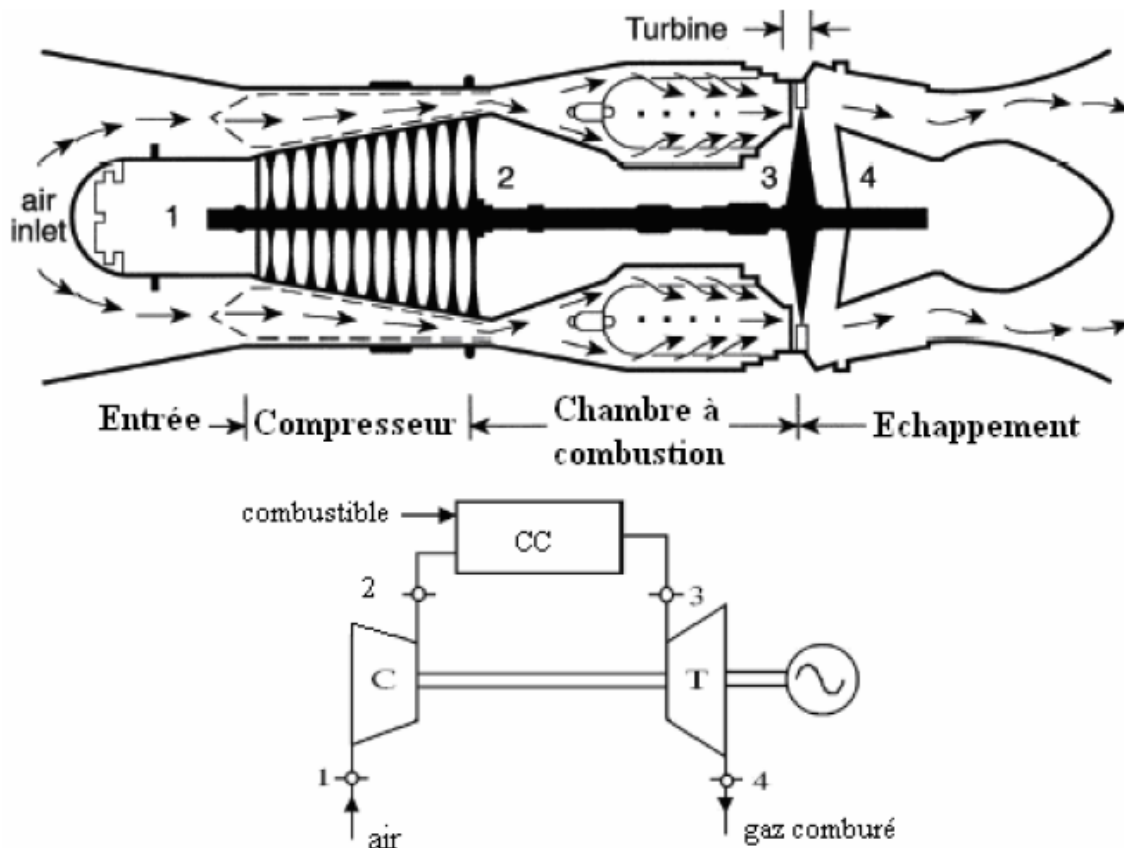


Figure 42 : Schéma d'une TAG.

IV.4 Le cycle théorique de Brayton

Le cycle théorique de Brayton encore appelé cycle de Joule, est le cycle de base des installations comportant des turbines à gaz (voir figure 43).

Les turbines à gaz fonctionnent habituellement selon un cycle ouvert. L'air atmosphérique s'engage dans le compresseur où il est comprimé à haute pression et à haute

température. Il est ensuite admis dans la chambre de combustion. Les gaz chauds résultant de la combustion se détendent alors dans une turbine qui produit un travail mécanique. A la sortie de la turbine, les gaz sont évacués dans l'atmosphère. [14]

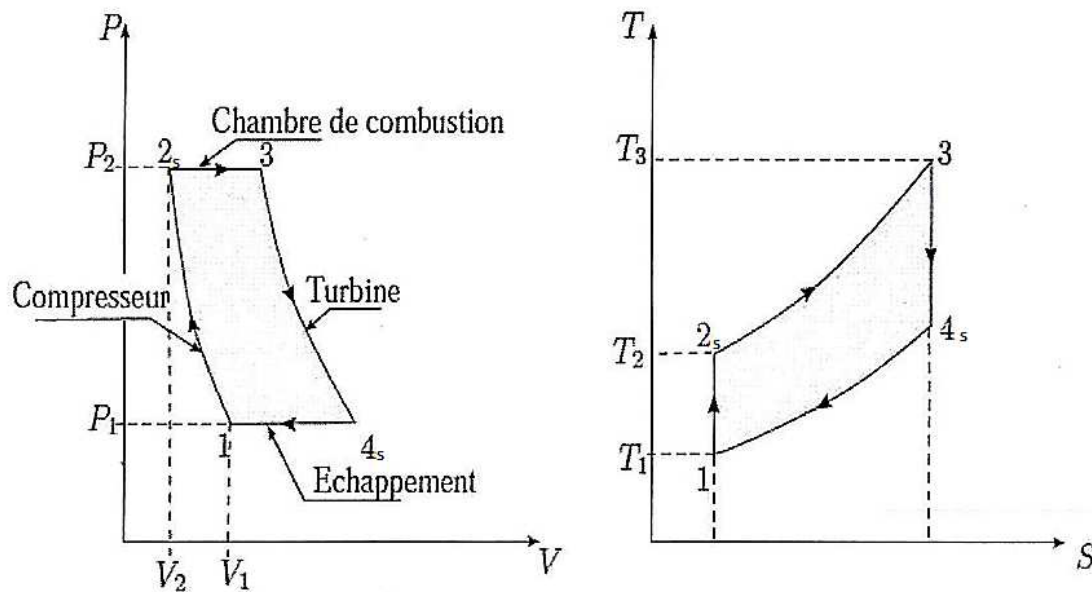


Figure 43: Représentation du cycle réversible de Brayton sur le diagramme T-S.

Le cycle de Brayton comprend quatre évolutions réversibles intérieurement qui sont illustrés dans le diagramme T-S de la figure 2 suivante (voir figure 44).

- 1 à 2 : une compression isentropique.
- 2 à 3 : un apport de chaleur à pression constante dans la chambre de combustion.
- 3 à 4 : une détente isentropique (dans la turbine).
- 4 à 1 : Echappement dans l'atmosphère à pression constante.

IV.5 Etude énergétique de cycle de Baryton

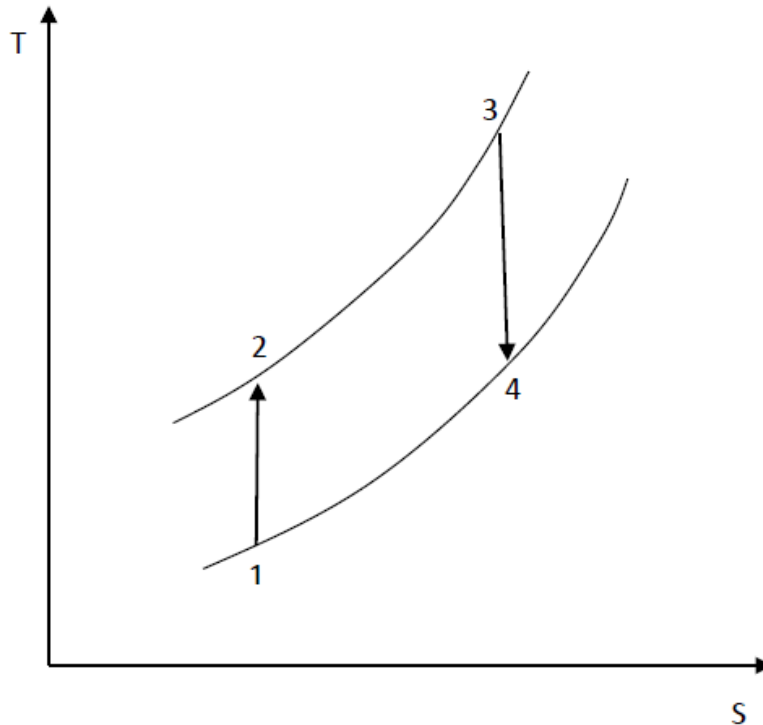


Figure 44 : Cycle de Baryton d'une turbine à gaz.

IV.5.1 Etude de la compression

- ✓ La pression à la sortie de compresseur (P_2) :

$$\tau = \frac{P_2}{P_1} P_2 = P_1 \cdot \tau$$

Avec τ : Taux de compression.

- ✓ Le travail isentropique fourni au gaz par le compresseur (W_{sc}) :

$$W_{sc} = C p_c (T_{2s} - T_1) = C p_c \cdot T_1 \left(\frac{T_{2s}}{T_1} - 1 \right)$$

- ✓ Le travail réel fourni par le compresseur (W_c) :

$$\eta_{sc} = \frac{W_{sc}}{W_c} W_c = \frac{W_{sc}}{\eta_{sc}}$$

- ✓ La température à la sortie de compresseur (T_2) :

$$W_c = C P_c (T_2 - T_1) \leftrightarrow T_2 = T_1 + \frac{W_c}{C p_c}$$

IV.5.2 Etude de la combustion

- ✓ Quantité de chaleur de la combustion (Q_{c-c}) :

$$Q_{c-c} = Cp_{cc}(T_3 - T_2)$$

Avec : Cp_{cc} : Chaleur spécifique du mélange.

- ✓ Rapport du mélange air-combustible : $f = \frac{m_c}{m_a}$

IV.5.3 Etude de la détente

- ✓ Le travail isentropique fourni par le gaz à la turbine (W_{ST})

$$W_{ST} = Cp_t(T_{4s} - T_3) = Cp_t \cdot T_3 \left(\frac{T_{4s}}{T_3} - 1 \right)$$

- ✓ Le travail réel fourni par le gaz à la turbine W_T :

$$\eta_{st} = \frac{W_T}{W_{ST}} W_T = \eta_{st} \cdot W_{ST}$$

- ✓ Température à la sortie de turbine (l'échappement) (T_4) :

$$W_T = Cp_t(T_4 - T_3)T_4 = T_3 + \frac{W_T}{Cp_t}$$

IV.5.4 Bilan de cycle

- ✓ Le travail utile (W_{UT}) :

$$W_{UT} = |W_T| - |W_C|$$

- ✓ La puissance de compresseur (P_C) :

$$P_C = m_a \cdot W_C$$

- ✓ La puissance de la turbine (P_T) :

$$P_T = m_a \cdot W_T$$

- ✓ La puissance utile (P_{UT}) :

$$P_{UT} = |P_T| - |P_C|$$

- ✓ Rendement théorique (η_{Th}) :

$$\eta_{Th} = \frac{W_{UT}}{Q_{c-c}}$$

- ✓ Rendement globale (η_g) :

$$\eta_g = \frac{P_{UT}}{m_a \cdot P_{Ci}}$$

IV.6 Cycle réel de la turbine à gaz

L'étude du cycle thermodynamique décrit réellement dans une turbine à gaz devrait, tenir compte de toutes les imperfections des différentes parties de cette machine. Cependant, dans le cycle réel il y a une certaine légère perte de pression dans le système de combustion (voir figure 45).

Nous considérons le cycle ouvert irréversible de Brayton composé de trois transformations :

- ✓ Une compression adiabatique, de rendement isentropique de compression η_{Cis} : en raison du frottement, la température réelle est plus élevée que la température théorique, et la transformation de compression n'est plus isentropique 1-2s mais 1-2, tel que $T_2 > T_{2s}$.

L'air est assimilé à un gaz parfait de propriété C_p et γ_a . Le débit d'air entrant dans la machine est noté $\dot{m}_a$.

- ✓ Un apport de chaleur (ou combustion) avec pertes de charge caractérisées par l'écart entre la pression de sortie du compresseur et celle d'entrée dans la turbine.

Le débit de combustible brûlé dans la combustion est notée $\dot{m}_c$. En fin de combustion, l'air et les résidus de combustion sont assimilés à un gaz parfait, de propriété C_{pg} et γ_g .

- ✓ une détente adiabatique, de rendement isentropique de compression η_{dis} : à cause des frottements, la transformation de la détente ne s'effectue pas suivant un arc d'isentrope, mais suivant un arc tel que $T_4 > T_{4s}$. [15]

Avec γ : Rapport de la chaleur spécifique.

C_p : la chaleur massique du gaz à pression constante.

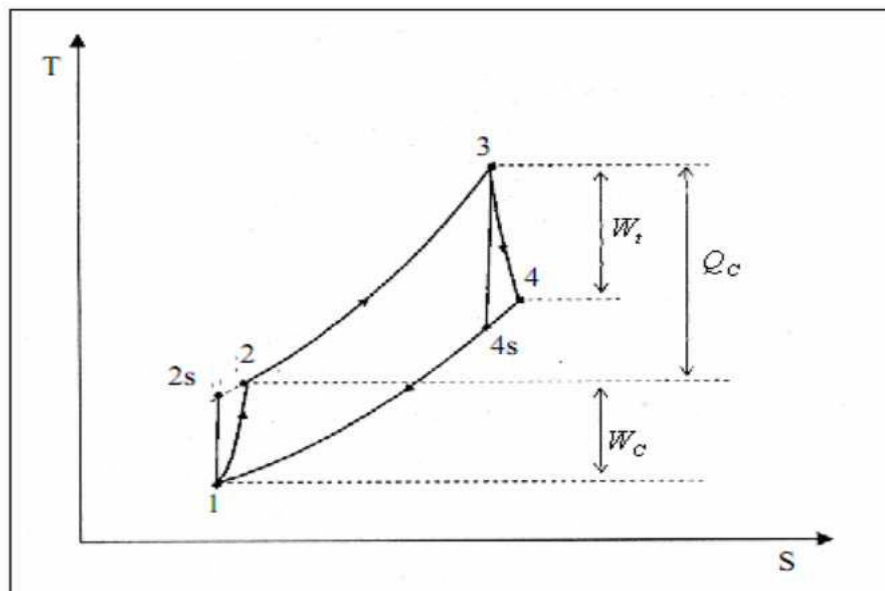


Figure 45 : cycle réel de la turbine à gaz dans le diagramme (T-S) [15].

IV.6.1 Etude de la compression (1-2)

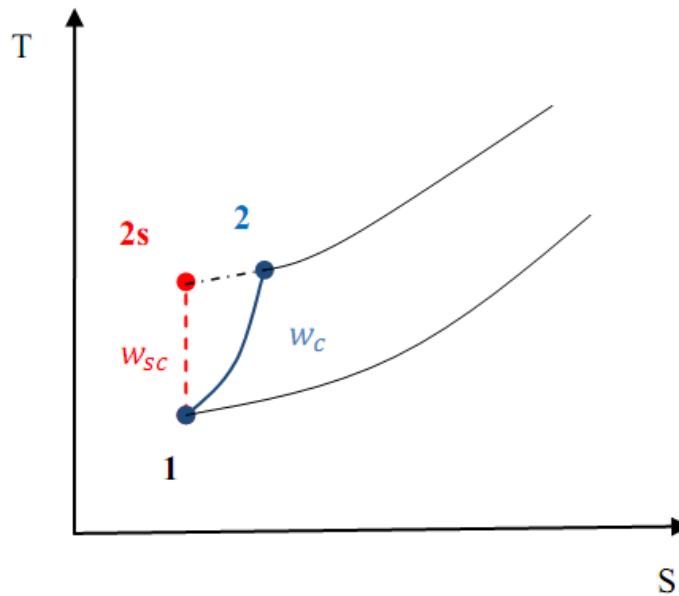


Figure 46 : représentation de la notion du travail d'un compresseur.

Le bilan énergétique entre l'entrée et la sortie du compresseur, nous donne :

$$W_C + Q = DH + DE_C + DE_P$$

W_C : Le travail absorbé par le compresseur.

Q : la chaleur fournie au système.

DH : Enthalpie totale spécifique.

DE_C : Variation de l'énergie cinétique.

DE_P : Variation de l'énergie potentielle.

- Le processus de compression peut être considéré comme adiabatique, donc Q peut être négligé.
- On considère encore que la différence de la hauteur est négligeable ; donc DE_P est nul.
- Puisque l'étude se fait sur un compresseur axial, la différence entre la vitesse d'entrée et la vitesse de la sortie est négligeable, DE_C peut aussi être négligée.

En tenant compte de toutes ces hypothèses, le travail réel spécifique (par unité de Masse) du compresseur est donné par :

$$W_C = H_2 - H_1$$

L'air est assimilé à un gaz parfait, l'équation peut s'écrire :

$$W_C = C_{Pa}(T_2 - T_1)$$

Avec T_1 et T_2 , respectivement les températures à l'entrée et la sortie du compresseur.

Et C_{pa} : la moyenne arithmétique des chaleurs massiques $C_{pa}(T_1)$ et $C_{pa}(T_2)$ de l'air, elle est obtenue par les relations suivantes [16].

$$C_{pa} = \frac{C_{pa}(T_1) + C_{pa}(T_2)}{2}$$

Dans le domaine des températures intéressant les turbines à gaz (200 à 2 000 K), on peut utiliser la formulation suivante [5] :

$$C_{pa} = 53,442 \theta^4 - 29,355 \theta^3 - 89,592 \theta^2 + 155,139 \theta + 1\,163,102$$

$$\theta = \frac{T - 1125}{875} [K]$$

Dans le cas d'une compression isentropique, le travail spécifique requis par la compression s'écrit :

$$W_{cis} = C_{pa} * (T_{2is} - T_1)$$

Le rapport des températures est lié au rapport des pressions par la relation suivante :

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

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

Le rendement isentropique du compresseur est défini comme étant le rapport entre le travail isentropique et le travail réel du compresseur, il est donné par la relation :

$$\eta_{cis} = \frac{H_{2is} - H_1}{H_2 - H_1} = \frac{T_{2is} - T_1}{T_2 - T_1}$$

IV.6.2 Etude de la transformation dans la chambre de combustion (2-3)

Dans la chambre de combustion, la réaction chimique entre l'air et le carburant est appelée la combustion, cette réaction entraîne une augmentation de la température à une pression constante. Cette étude est basée sur les hypothèses suivantes :

- La combustion est considérée comme instantanée.
- Pas de production de travail.
- L'énergie cinétique et potentielle est négligée dans l'équilibre d'énergie.

Le bilan énergétique est donné comme suit :

$$Q_{cc} = H_3 - H_2$$

Avec H_2 et H_3 , respectivement les enthalpies spécifiques à l'entrée et la sortie de la chambre de combustion.

La quantité de chaleur fournie au fluide peut s'écrire :

$$Q_{cc} = (m_a + m_c)C_{pg}T_3 - m_a C_{pa}T_2 \quad (*)$$

En divisant cette équation par m_a on aura :

$$Q_{cc} = C_{Pg}(1 + f)T_3 - C_{pa}T_2$$

Avec : $f = \frac{m_c}{m_a}$: Rapport des débits dans une chambre de combustion.

De l'équation (*) La puissance dégagée par la combustion a pour expression :

$$P_{cc} = C_{pg}(m_a + m_c)T_3 - C_{pa} \cdot m_a T_2$$

Le rendement de combustion est défini comme étant le rapport de la puissance réelle sur la puissance calorifique fournie par le combustible, noté η_{cc} , son expression donné par :

$$\eta_{cc} = \frac{P_{cc}}{m_c \times PCI}$$

Les pertes de charge en cours de combustion :

$$\frac{\Delta P_{23}}{P_2} = \frac{P_2 - P_3}{P_2}$$

IV.6.3 Etude de la détente (3-4)

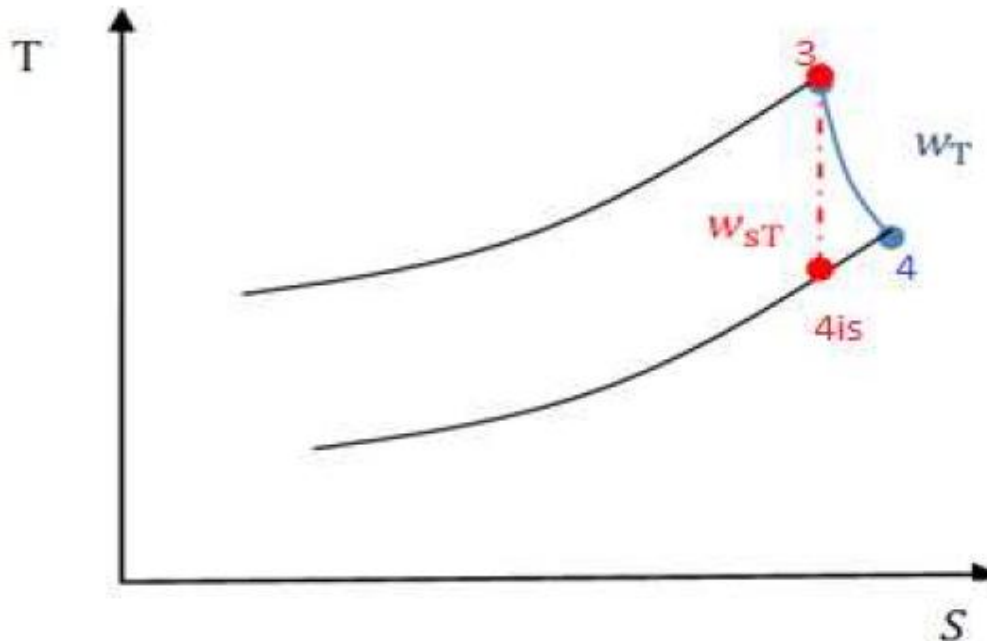


Figure 47 : Représentation de la notion de travail d'une turbine.

En raisonnant de la même manière que pour le compresseur (détente adiabatique, avec un gaz parfait), le bilan énergétique s'écrit comme suit :

$$W_t + Q = \Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p$$

W_t : Le travail de détente.

Q : la chaleur fournie au système.

ΔH : enthalpie totale spécifique.

ΔE_c : variation de l'énergie cinétique.

ΔE_p : variation de l'énergie potentielle.

L'évolution étant adiabatique ($Q=0$), le terme de l'énergie cinétique ΔE_c ainsi que l'énergie potentielle ΔE_p peuvent être négligés.

L'évolution étant adiabatique ($Q=0$), le terme de l'énergie cinétique ΔE_c ainsi que l'énergie potentielle ΔE_p peuvent être négligés.

$$W_t = H_3 - H_4$$

H_3 et H_4 , respectivement les enthalpies spécifiques à l'entrée et la sortie de la turbine.

Par conséquent on peut écrire l'équation en fonction des températures d'entrée et de sortie, le travail spécifique réel de détente par unité de masse peut s'écrire :

$$W_t = (1 + f)C_{pg}(T_3 - T_4)$$

Dans le cas d'une détente isentropique le travail spécifique fourni par la détente est :

$$W_t = (1 + f)C_{pg}(T_3 - T_{4is})$$

Le rendement isentropique de détente s'écrit :

$$\eta_{tis} = \frac{H_3 - H_4}{H_3 - H_{4is}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4is}}$$

La puissance développée par la turbine :

$$P_t = (m_a + m_c)W_t$$

IV.7 Cycle de fonctionnement de la centrale

Le cycle de fonctionnement qui nous conduit à une production d'énergie électrique comprend quatre phases :

- Transformation de l'énergie mécanique en énergie potentielle de l'air comprimé dans le compresseur par aspiration.
- Transformation de la valeur calorifique du carburant en énergie thermique dans la chambre de combustion.
- Transformation de l'énergie cinétique du débit de gaz chaud issus de la chambre de combustion en énergie mécanique dans la turbine.
- Transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique dans l'alternateur, et par conséquence, génération de l'électricité. [14]

IV.8 Conclusion

Un cycle thermodynamique est une suite de transformations successives qui part d'un système thermodynamique dans un état donné, le transforme et le ramène finalement à son état initial, de manière à pouvoir recommencer le cycle. Au cours du cycle, le système voit sa température, sa pression ou d'autres paramètres d'état varier, tandis qu'il échange du travail et réalise un transfert thermique avec l'extérieur.

Chapitre V : Plan de Maintenance de la Centrale

V. Introduction

Dans un contexte économique concurrentiel, les entreprises cherchent à fiabiliser et à optimiser le fonctionnement de leurs installations. Les entreprises doivent améliorer la productivité en garantissant la disponibilité et la qualité de leur outil de production d'une part, et de remplir les obligations de sécurité d'autre part. La maintenance des installations industrielles est donc au cœur des préoccupations des exploitants.

V.1 Définition de la maintenance

D'après l'AFNOR (NFX 606010) : «la maintenance est l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé».

Dans une entreprise, maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, réparation, graissage, contrôle, etc.), qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la production avec efficacité et qualité.

«Maintenir» c'est intervenir dans de meilleures conditions ou appliquer les différentes méthodes afin d'optimiser le coût global de possession : maintenir, c'est maîtriser.

Le terme «rétablir», nous assimilons le verbe «rétablir» à, une notion de correction sur une entité qui n'est plus en mesure d'accomplir convenablement sa fonction. [21]

V.2 Objectifs de la maintenance**▪ Améliorer la fiabilité du matériel**

La mise en œuvre de la maintenance préventive nécessite les analyses techniques du comportement du matériel. Cela permet à la fois de pratiquer une maintenance préventive optimale et de supprimer complètement certaines défaillances. [24]

▪ Garantir la qualité des produits

La surveillance quotidienne est pratiquée pour détecter les symptômes de défaillance et veiller à ce que les paramètres de réglages et de fonctionnement soient respectés. Le contrôle des jeux et de la géométrie de la machine permet d'éviter les aléas de fonctionnement. La qualité des produits est ainsi assurée avec l'absence des rebuts.

▪ Améliorer l'ordonnancement des travaux

La planification des interventions de la maintenance préventive, correspondant au planning d'arrêt machine, devra être validée par la production. Cela implique la collaboration de ce service, ce qui facilite la tâche de la maintenance. Les techniciens de maintenance sont souvent mécontents lorsque le responsable des fabrications ne permet pas l'arrêt de l'installation alors qu'il a reçu un bon de travail pour l'intervention. Une bonne coordination prévoit un arrêt b selon le planning défini à l'avance et prend en compte les impossibilités en fonction des impératifs de production.

▪ Assurer la sécurité humaine

La préparation des interventions de maintenance préventive ne consiste pas seulement à respecter le planning. Elle doit tenir compte des critères de sécurité pour éviter les imprévus dangereux.

Par ailleurs le programme de maintenance doit tenir compte des visites réglementaires.

▪ **Améliorer la gestion des stocks**

La maintenance préventive est planifiable. Elle maîtrise les échéances de remplacement des organes ou pièces, ce qui facilite la tâche de gestion de stocks. On pourra aussi éviter de mettre en stock certaines pièces et ne les demander que le moment venu.

▪ **Améliorer le climat de relation humaine**

Une panne imprévue est souvent génératrice de production. Certains problèmes, comme par exemple le manque de pièces de rechange, entraîne l'immobilisation de la machine pendant longtemps. La tension peut monter entre la maintenance et la production.

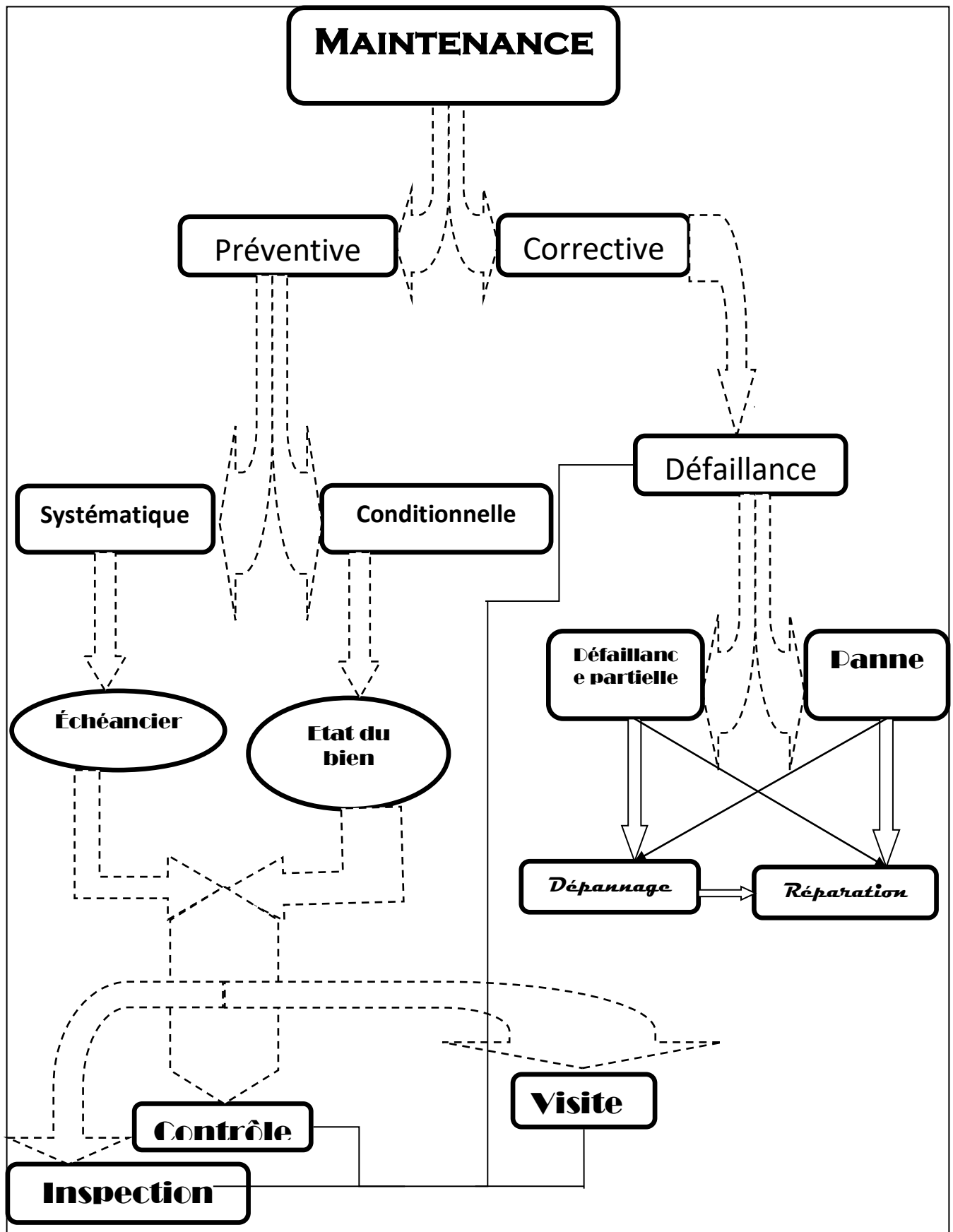
En résumé, il faudra examiner les différents services rendus pour apprécier les enjeux de la maintenance préventive :

- La sécurité : diminution des avaries en service ayant par conséquence des catastrophes
- La fiabilité : amélioration, connaissance des matériels.
- La production : moins de panne en production.

V.3 Les différents types de maintenance

La maintenance peut classer en deux catégories composées elles-mêmes de sous-catégories [22] (voir le tableau 16) :

Tableau 16: Les types de maintenance.



V.3.1 La maintenance préventive

Selon la norme AFNOR NF60-010, la maintenance préventive est définie comme une maintenance effectuée selon des critères d'un bien. Elle vise à diminuer la probabilité de défaillance d'un système, pour cela elle s'appuie sur la maintenance systématique et la maintenance conditionnelle. [13]

V.3.1 La maintenance préventive systématique

Est une maintenance effectuée selon un échancier établi selon le temps ou le nombre d'unité d'usage (AFNOR [1]), cette maintenance se pratique quand on souhaite procurer à un équipement une sécurité de fonctionnement. La mise en pratique de cette maintenance nécessite de décomposer les machines en éléments maintenables. Ces éléments doivent être visités ou changés périodiquement[21].

Cette méthode nécessite de connaître :

- Le comportement du matériel.
- Les modes de dégradations.
- Le temps moyen de bon fonctionnement entre deux avaries.

V.3.1.2 Maintenance préventive conditionnelle

D'après la définition AFNOR, il s'agit de la «maintenance, subordonné à un type d'événement prédéterminé (autodiagnostic, information d'un capteur, mesure...)». Cette forme de maintenance permet d'assurer une surveillance continue des points sensibles de l'équipement au cours des visites préventives dans leur rôle élimine les pannes accidentelles ou les réduire d'un niveau acceptable).

V.3.1.3 La maintenance prévisionnelle

Maintenance préventive subordonné à l'analyse de l'évolution surveillée des paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et de planifier les interventions.

V.4 Avantages et inconvénients de la maintenance préventive

• Avantage

- Bonne préparation de l'intervention.
- Durée de mobilisation du matériel minimisée.
- Facilité de programmation et de planification des travaux.

• Inconvénients

- Frais de gestion de stock importants.
- Frais dus à la planification.

- Charges supplémentaires dues formation du personnel.

V.5 La maintenance corrective

Selon AFNOR «Opération de maintenance effectué après détection d'une défaillance». Elle consiste à remettre l'équipement en état de marche lors d'une panne (voir la figure 48). La maintenance corrective débouche sur deux types d'intervention[23].

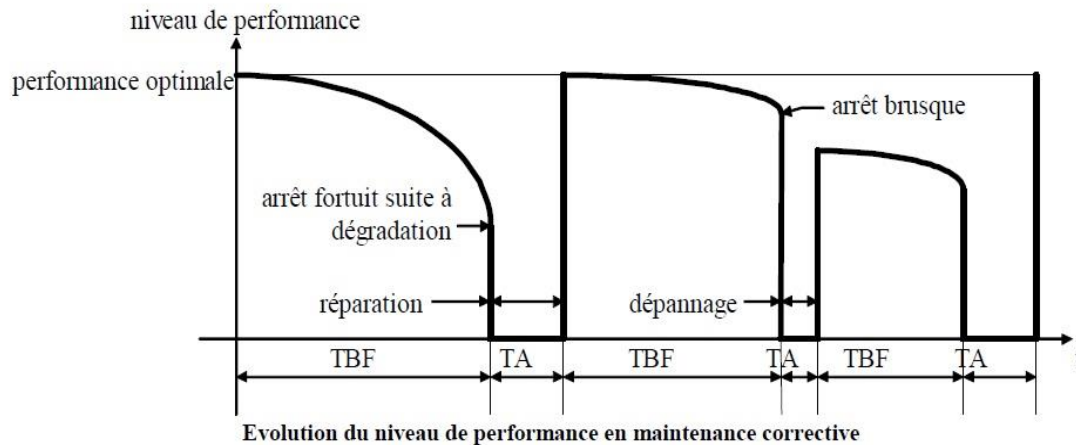


Figure 48: Schéma explicatif de la maintenance corrective.

Il existe deux formes possibles de maintenance corrective :

V.5.1 La maintenance palliative (Les dépannages)

Il consiste à la remise en marche provisoire de l'équipement. Il caractérise la maintenance palliative.

V.5.2 La maintenance curative (Les réparations)

Dans ce cas la maintenance sera une intervention définitive et limitée, elle caractérise la maintenance curative.

V.6 Avantages et inconvénients de la maintenance corrective

• Avantage

- Un budget d'entretien moyen.
- Cout direct minimisé.
- Frais de gestion de stock non important.

• Inconvénients

- Temps d'arrêt et d'intervention est trop élevée
- Cout de maintenance élevé.
- Achats des pièces de rechange à un prix élevé.

V.7 Les niveaux de la maintenance

Il existe cinq niveaux de la maintenance[21]

A- Le 1^{er} niveau

Il s'agit essentiellement de contrôle et de relevés des paramètres de fonctionnement des machines sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement, ou échanges d'éléments consommables accessibles en toute sécurité comme :

- Niveau d'huile moteur.
- Température d'eau de refroidissement.
- Niveau de la réserve de combustible.

Ces contrôles peuvent donner suite à des interventions simples de maintenance ne nécessitant pas de réalisation d'un diagnostic de panne et de démontage.

B- Le 2^{ème} niveau

Il s'agit de dépannages par échange standard, des éléments prévus à cet effet et opération mineurs de maintenance préventive.

Ces opérations sont réalisées par un technicien ayant une formation spécifique. Ce dernier suit les instructions de maintenance qui définissent les tâches, la manière et les outillages spéciaux. Les pièces de rechange sont essentiellement du type consommable, filtres, joints, huile, liquide de refroidissement.

C- Le 3^{ème} niveau

Il s'agit des opérations de maintenance préventive, curative, identification et diagnostic des pannes, réparations mécaniques mineurs.

Les opérations réalisées peuvent nécessiter un diagnostic de panne :

- Remplacement d'un disjoncteur.
- Contrôle des turbocompresseurs.
- Contrôle des refroidisseurs.
- Réglages des jeux de soupapes.

Ces opérations sont réalisées par un technicien spécialisé. Toutes les opérations se font avec l'aide d'instructions de maintenance et d'outils spécifiques tels que les appareils de mesure ou de calibrage. Ces opérations peuvent conduire à des opérations de 4^{ème} niveau.

D- Le 4^{ème} niveau

Il s'agit d'opérations importantes ou complexes à l'exception de la reconstruction de l'équipement :

- Déculassage (révision, rectification)
- Révision de la cylindrée
- Contrôle d'alignement du moteur / alternateur

- Changement des pôles d'un disjoncteur.

Ce type d'intervention peut être effectué par des techniciens bénéficiant d'un encadrement technique très spécialisé, d'un outillage général complet et d'un outillage spécifique. Elles font aussi appel à des ateliers spécialisés (rectification, ré usinage).

E- Le 5^{ème} niveau

Il s'agit d'opérations lourdes de rénovation ou de reconstruction d'un équipement. Ces opérations entraînent le démontage de l'équipement et son transport dans un atelier spécialisé.

Le 5^{ème} niveau de maintenance est réservé au constructeur ou reconstruteur. Il nécessite des moyens similaires à ceux utilisés en fabrication.

V.8 Les fonctions du service maintenance

(Norme FD X60-000)

Tableau 17: fonctions de la maintenance.

Les fonctions de la maintenance	Etude
	Réparations
	Ordonnancement
	Réalisation
	Gestion

V.8.1 Etude (fonction méthode)

Cette fonction est considérée comme le cerveau du service de maintenance, sa mission principale est l'analyse du travail à réaliser en fonction de la politique de maintenance choisie. Elle implique la mise en œuvre d'un plan de maintenance avec des objectifs chiffrés et des indicateurs mesurables.

V.8.2 Fonction préparation

Bien que le découlement de la fonction méthode, la préparation du travail détermine le processus des différentes phases. Toutes les conditions nécessaires à la bonne réalisation d'une intervention de maintenance seront ainsi prévues, définies et caractérisées.[25]

Quel que soit le type d'intervention à réaliser, la préparation sera toujours présente. Elle sera :

Implicite (non formalisé) : dans le cas de tâches simples, l'intervenant assurera lui-même, par expérience et de façon souvent automatique la préparation de ses actions.

Explicite (formalisé) : réalisée par un préparateur, elle donne lieu à l'établissement d'un dossier de préparation structure qui, faisant partie intégrante de la documentation technique, sera utilisé chaque fois que l'intervention sera réalisée.

V.8.3 Fonction d'ordonnancement

Cette fonction rassemble les moyens et matériels pour rendre exécutable les travaux à réaliser, elle établit la programmation des travaux, suit leur avancement et veille respect des délais au respect des délais ; elle définit les besoins en main d'œuvre, contrôle et regroupe les informations relatives aux travaux.[24]

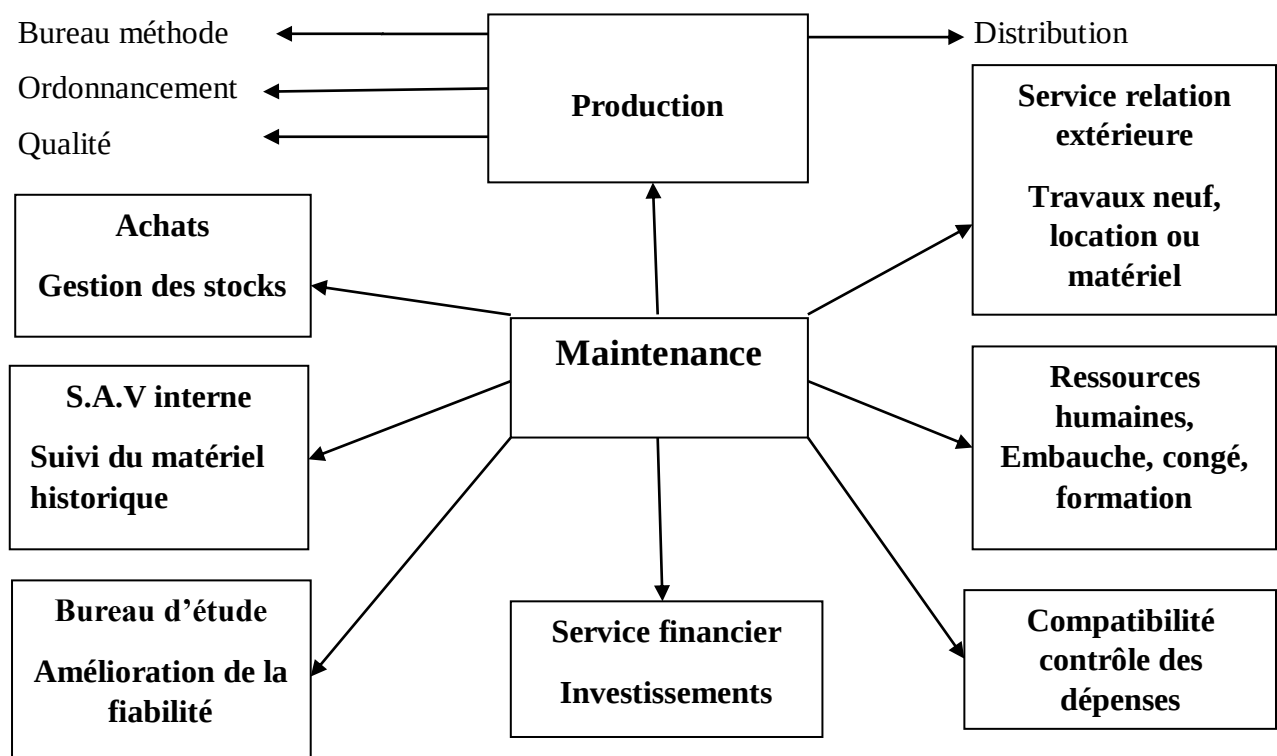
V.8.4 Fonction réalisation

La réalisation consiste à mettre en œuvre les moyens définis dans le dossier de préparation dans les règles.

V.8.5 Fonction gestion

La fonction gestion du service maintenance devra être capable d'assurer la gestion des équipements, la gestion des interventions, la gestion des stocks, la gestion des ressources humaines, et la gestion du budget.

V.9 Place du service maintenance dans l'entreprise



V.10. Les opérations de maintenance

Les inspections : activités de surveillance consistant à relever périodiquement des anomalies et exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de l'outil de production ou des équipements. [21]

Les visites : opérations de surveillance qui, dans le cadre de maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité déterminée. Ces interventions correspondent à une liste d'opérations définies préalablement qui peuvent entraîner des démontages d'organes et une immobilisation du matériel. Une visite peut entraîner une action de maintenance corrective.

Les contrôles : vérification de conformité par rapport à des données préétablies suivies d'un jugement. Le contrôle peut :

- ❖ Comporter une activité d'information.
- ❖ Inclure une décision : acceptation, opérations, rejet, ajournement.
- ❖ déboucher comme les visites sur des opérations de maintenance corrective.

Les opérations de surveillance (contrôles, visites, inspections) sont nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du bien. Elles sont effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

Autres opérations**Révision**

Ensemble des actions d'examen, de contrôles et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné

Il faut distinguer suivant l'étendue des opérations à effectuer les révisions partielles et révisions générales. Dans les 2 cas, cette opération nécessite la dépose de différents sous-ensembles

Le terme révision ne doit en aucun cas être confondu avec les termes visites, contrôles, inspections.

Les 2 types d'opérations définis (révision générale ou partielle) relèvent du 4^{ème} niveau de maintenance.

Les échanges standards

Reprise d'une pièce ou d'un organe ou d'un sous-ensemble usagé, et vente au même client d'une pièce ou d'un organe ou d'un sous-ensemble identique, neuf ou remis en état conformément aux spécification du constructeur, moyennant le paiement d'une soulte dont le montant est déterminé d'après le cout de remise en état.

Soulte : somme d'argent qui, dans un échange ou dans un partage, compense l'inégalité de valeur des biens échangés.

V.11 Les temps de maintenance

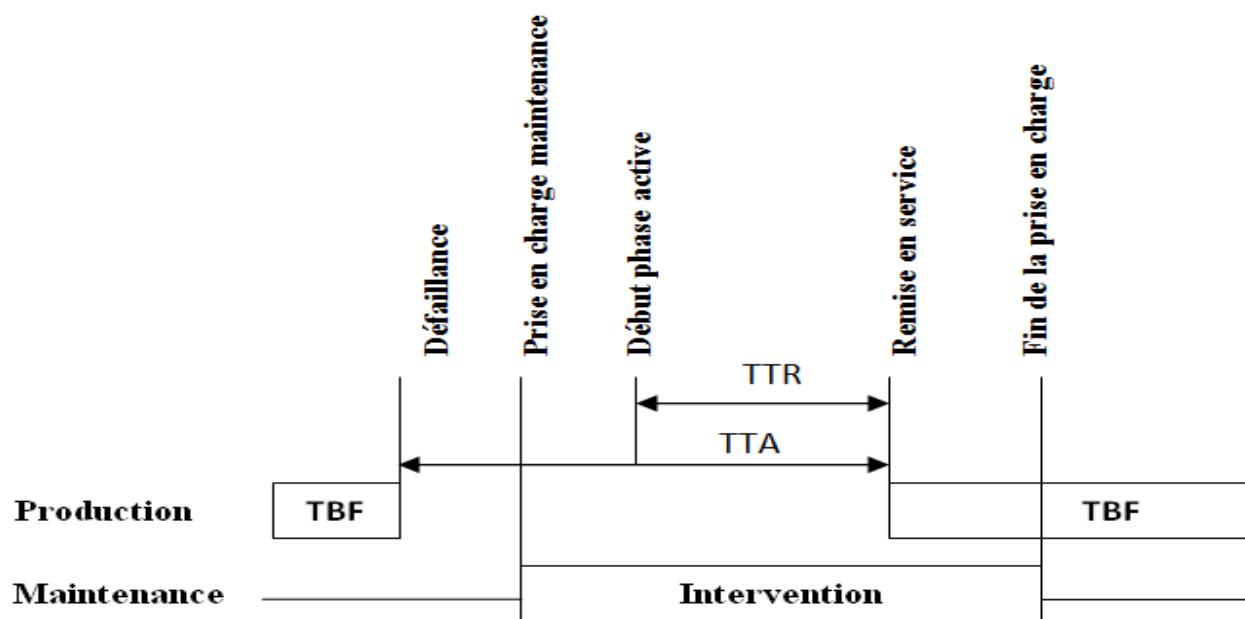


Figure 49 : Temps caractéristiques lors d'une intervention.

1- MTBF

La MTBF, ou moyenne des temps de bon fonctionnement, est la valeur moyenne des temps entre deux défaillances consécutives. Pour une période donnée de la vie d'un matériel.[21]

$$MTBF = \frac{\text{Temps de bon fonctionnement}}{\text{nombre de défaillance}}$$

Ces valeurs sont calculées à partir des observations, d'une exploitation statistique de l'historique des essais de durée de vie.

2- La MTTR

La MTTR est la moyenne des temps techniques de réparation (TTR)

Le TTR est le temps durant laquelle on intervient physiquement sur le système défaillant. Il débute lors de la prise en charge de ce système jusqu'après les contrôles et essais avant la remise en service.[22]

$$MTTR = \frac{\text{Temps d'arrêt}}{\text{nombre de défaillance}}$$

3- La MTTA

La MTTA est la moyenne des temps techniques d'arrêt (TTA). Les temps techniques d'arrêt sont une partie des temps d'arrêt que peut connaître un système de production en exploitation. Ils ont pour cause une raison technique et ce faisant, sont à distinguer des arrêts inhérents à la production (attente de pièce, de matière, d'énergie, changement de production, etc).[22]

V.12 La disponibilité

C'est la probabilité de bon fonctionnement d'un dispositif à l'instant t dans des conditions données.

Augmenter la disponibilité d'un matériel consiste à diminuer le nombre de ses arrêts.

V.13 La fiabilité

C'est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise dans des conditions données, pendant une durée donnée, elle exprime la probabilité qu'il fonctionne correctement sans défaillance pendant un temps déterminé dans des conditions fixées de manière précise [22]

V.14 Elaboration d'un plan de maintenance

Le plan de maintenance n'est autre que l'ensemble des mesures à prendre pour éviter, les conséquences des défaillances sur les équipements et ses fonctions et son environnement ceci selon les objectifs de chaque entreprise et les contraintes sur lesquelles elle est soumise.

L'élaboration d'un plan de maintenance se fait au niveau d'une unité de maintenance. Elaborer un plan de maintenance préventive, c'est décrire toutes les opérations de maintenance préventive qui devront être effectuées sur chaque organe, la réflexion sur l'affectation des opérations de maintenance se fait en balayant tous les organes de la décomposition fonctionnelle et en tenant compte de leur technologie, de leur environnement (sec, humide, poussiéreux, chaud, non couvert, etc), de leur utilisation, de leur probabilité de défaillance et de leur impact, sur la production et sur la sécurité (humaine et matérielle).

L'affectation des opérations de visite ou de contrôle a comme objectif de détecter les effets des dysfonctionnements qui peuvent arriver sur chacun de ces organes.

Les différentes sources qui nous aident à définir les opérations de maintenance préventive sont [16] :

- les documents techniques constructeurs.
- L'expérience de chacun (dépanneurs, et conducteurs de machine) et du rédacteur.
- Les historiques de la machines concernée et éventuellement celles des machines de même types.
- Les recommandations des constructeurs.
- La base de données des organes très courants (standard de maintenance préventive).
- Les valeurs MTBF
- Les conditions d'utilisation (taux d'engagements, environnement...)

V.15 La Gestion de maintenance assistée par ordinateur

La GMAO est une méthode outil de gestion de maintenance organisée autour d'une base des données permettant de programmer et de suivre sous trois aspects (technique, budgétaire, organisationnelle), tous les activités d'un service de maintenance à partir de terminaux disséminés dans les bureaux techniques, les ateliers, les magasins et bureau d'approvisionnement. Pour l'entreprise de production d'électricité SPE à souhaiter améliorer la productivité de leurs équipements, à opter pour l'utilisation de système SYANA (système de gestion de la maintenance assistée par ordinateur), Ce système est d'une aide considérable pour l'élaboration d'une stratégie de maintenance curative. En effet, il présente plusieurs fonctionnalités comme la gestion des interventions de maintenance (historique et rapports), la gestion des pièces détachées, la gestion des équipes de maintenance (répartition des tâches, planning.), **SYANA** a été conçue comme étant une application web.[31]

Pour y accéder il suffit d'avoir l'adresse URL correspondante et se munir d'un compte d'accès



Figure 30: La page d'accueil SYANA.

V.15.1 Les modules SYANA

Les modules de la solution SYANA sont décrits dans ce qui suit :

a) Module Maintenance

Ce module permet la gestion des équipements de production, gestion des ressources, l'édition des demandes d'intervention, la planification des interventions, gestion des permis de travail et suivi des travaux d'intervention.

b) Module Achat

Ce module permet la gestion des contrats et commandes d'achat, demandes d'offres fournisseurs, le suivi de la satisfaction des demandes d'achat, le suivi des livraisons et des arrivages ainsi que le suivi des factures d'achat et facture de frais pour le calcul du cout d'achat final.

c) Module Stock

Ce module permet la gestion des magasins et des dotations des items en stock, l'édition des demandes d'achat pour s'approvisionner, les demandes de transfert inter magasins ainsi que les demandes de sortie de matériel stockable. Il permet de plus le suivi des différents mouvements de stock et l'établissement des inventaires de stock ;

d) Module Commun

Ce module permet la gestion des données partagées entre les différents domaines intégrés dans SYANA : maintenance, stock et achat comme les demandeurs, les articles et services, fournisseurs, pays, monnaie, référence fournisseur etc...

e) Module administration

Ce module permet la gestion des entités organisationnelles, des utilisateurs et des profils, la configuration de la visibilité des données et des paramètres système et métier selon le besoin de la société

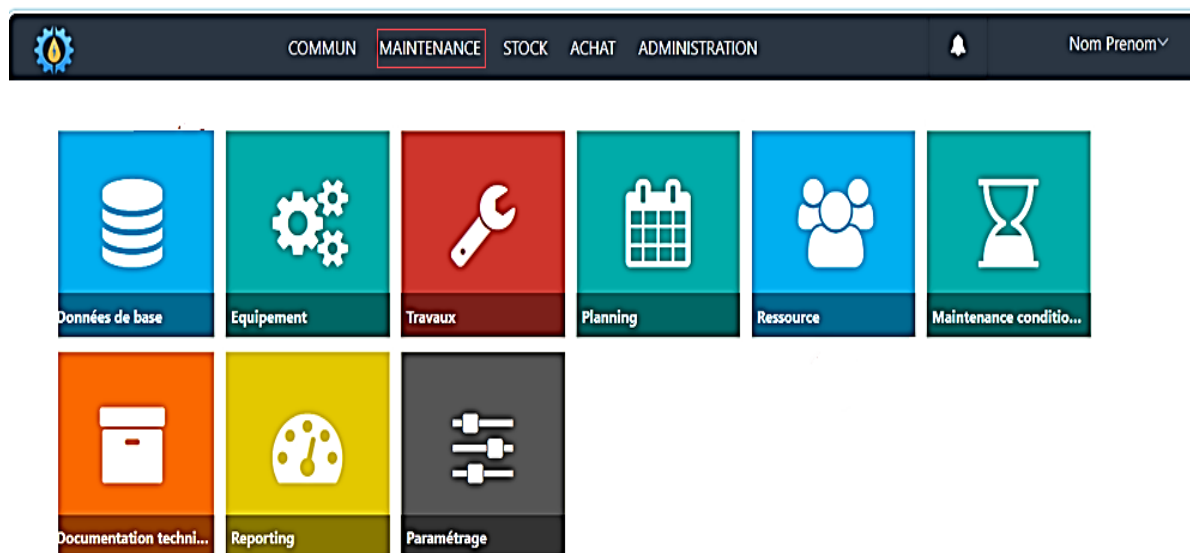


Figure51 : Les différents modules et sous-modules de SYANA [31].

V.15.2 Les documents utilisés dans la SYANA

1. Demande d'intervention

	Demande d'intervention	SPE / HAM / HAM1
		Code : .
		N° de référence : HAM1/2022/0098
		Date Demande d'intervention: 24/03/2022

N° DI: HAM1/2022/0098	Etat de la DI: 3.LANCE EN OT	Crée le: 24/03/22 14:56
Informations sur la		
Demanded par : Code équipement: HAMTGM2 Designation équipement: TGM2 Priorité: Faible: Travaux ordinaires Circuit de validation: Demande validée du: Thu Mar 24 14:55:00 CET 2022 Au Fri Mar 25 14:55:00 CET 2022		Problème constaté:
Demande validée du:		
Informations sur OT:		
Equipement: TGM2	Numéro OT:	
Zone: HAM1_TG0	Etat OT:	
Fonction:	OT achevé le:	
C. Charge: 030334200		
Superviseur:		
Intervention:		
Note 1: Note 2: Visa 2:		
Combinée à: Lancement: Planifier le:/...../.....		

Figure 52 : Demande d'intervention (DI) [31]

2. Ordre de travail

	Ordre de travail - OT		SPE / HAM / HAM1	
			Code : SPE.MAINT.OT.01 Version: 1.0 Date document: 01/01/2021	
			N° de référence : HAM1/2022/0544	
			Date Ordre travail: 22/03/2022	

Numéro OT: HAM1/2022/0544

Equipement:	HAMTGM1	TGM1	Niveau:	3
Système:	HAM12	CENTRALE HAMMA 01		
Zone:	HAM1_TG0	Tranche de production turbine à gaz annexe centrale HAMMA		
Fonction:				
C. Charge:	936334200	TG MOBILE HAMMA		
Intervention:	MPS000054	INSPECTION PÉRIODIQUE DES TGM LM 2500		
Entité émettrice:			Entité réalis:	Siège
Superviseur:	Etudes Electrique	N° Série Equip:		Priorité: 2
Permis travail:	PT/HAM1/2022/0325			

Date début prévue:	Durée Inter:	Contrat:	Projet:
13/02/22 08:00	224.0 Heure	N° DI:	N° Plan:
Date fin prévue:	Type de l'intervention:	Demandé par : EL MIR Abderahmane	
15/02/22 16:00	MPS	OT pere :	
Equipe:	Classe :		
	02		

Ressources requises

Stock requis

Commentaires

PROBLEME A REGLER:

TGM N°11

La journée du 13/02/2022 Taux

d'avancement :65%

Diagnostic

Symptome:

Défaut:

Cause:

Remède:

Figure53: Ordre de travail (OT) [31].

3. Demande d'achats stock

	Demande d'achat stock	SPE / HAM / HAM1
		Code :
		N° de référence : HAM1/2020/0006
		Date Demande:

Demandé par :

C. Charge : 932334416

Code magasin : HAM

Objet : Achat pressostat

Liste des articles :

Articles	Designation	Groupe	Unité	Quantité demandée	Observation
014309050039	PRESSOSTAT	43	U	1.0	

Figure 54: Demande d'achats stock [31].

V.16 Les étapes de déroulement les interventions de la maintenance préventive

Étape1 : l'ordre de travail est remis au chef de service de réalisation maintenance, ce dernier classera le type d'intervention et la remettra à l'ingénieur concerné soit maintenance électrique ou bien instrumentation (voir figure 53).

Étape2 : l'ingénieur chef maintenance va remettre l'ordre de travail au chef de section concerné ce dernier va designer l'équipe des intervenants composés principalement par des techniciens en instrumentation ou bien électrique.

Étape3 : après cette procédure les intervenants vont mettre en œuvre les instructions dans l'ordre de travail.

V.17 Planning des interventions préventives

V.17.1 Les interventions mécaniques

Mensuel

- Contrôle des fuites
- Contrôle des fissures
- Manœuvre des vannes

Semestriel

- Contrôler le serrage des vis et boulons

- Contrôle la corrosion des boulons et rondelles
- Nettoyage et redressement les surfaces des ailettes de l'échangeur
- Graissage arbre ventilateur
- Contrôler les pales et les pieds des pales

Annuel

- Graissage des roulements
- Contrôler le serrage des écrous et des boulons

V.17.2 Les interventions électriques**Journalière**

Faire un contrôle visuel pour vérification l'état de matériel et l'absence condition anormal (bruit excessive, vibration, fuites, surchauffes, etc.)

Tous 3 mois

- Nettoyer de moteur et boîte à bornes
- Vérifier l'état des bornes du moteur
- Essai d'isolement du moteur et de câble
- Mesures d'intensité de courant et de vibrations
- Fais lubrification des roulements du moteur (entre 700h et 800h)
- Vérifier le fonctionnement de la résistance anti condensation
- Contrôler tous les écrous et les boulons du moteur soient serrés de manière appropriée

Tous les 3 ans

- Vérifier l'état général du matériel (corrosion, peinture, trace d'échauffement...)
- Contrôler le serrage des connexions
- Contrôler l'état des roulements, au besoin les remplace et les régraisser
- Vérifier le fixage et mise à la terre

V.18 Les méthodes de maintenance**V.18.1 Méthode ISHIKAWA**

« ISHIKAWA » ou le « diagramme causes/effets » est une méthode de résolution de problème qui vise à explorer toutes les dimensions de ce dernier en classant par famille et sous-familles les causes de celui-ci (voir figure 55).[26]

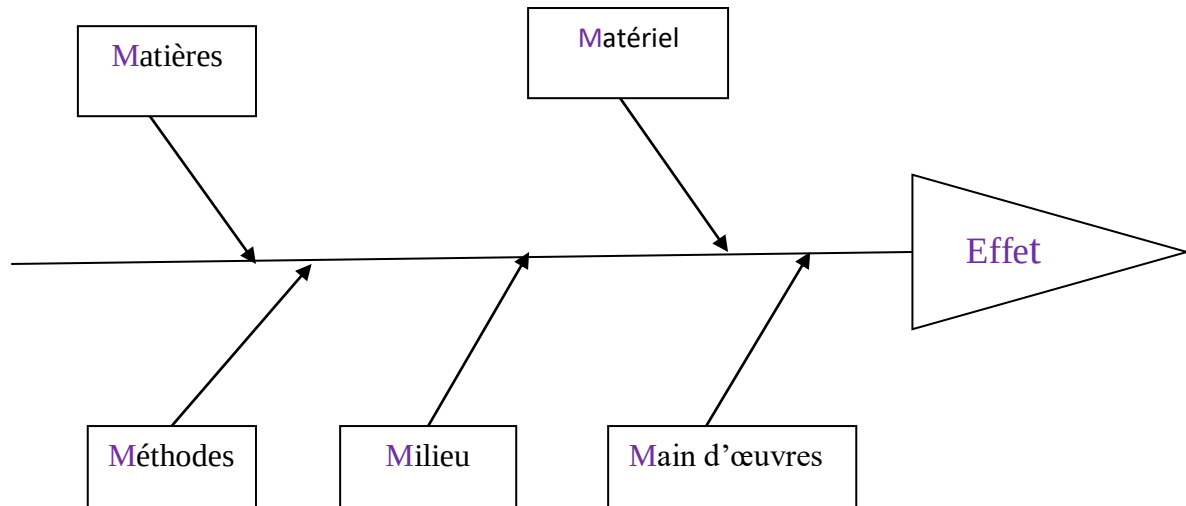


Figure 55: Diagrammes causes effets.

V.18.2 Diagramme de Pareto

Le diagramme de PARETO, également connu sous le nom de la loi 80/20 est une méthode d'optimisation et de résolution de problème très connue dans le milieu industriel.

Le diagramme de PARETO est un diagramme en colonnes, exposant et classant, par ordre décroissant d'importance, les causes ou problème, la hauteur des colonnes est alors proportionnelle à l'importance de chaque cause. [32]

V.18.3 Méthode 5S

C'est un outil d'amélioration continue importé du Japon, permettant d'optimisée l'organisation et l'efficacité d'un poste de travail, d'un service, d'une entreprise.[28]

L'appellation '5S' vient des initiales des mots clés de la méthode.

SEIRI : C'est débarrasser (éliminer ce qui est inutile)

SEITON : (ranger) concevoir un espace de travail efficace ou chaque chose à une place bien définie facilitant son utilisation.

SEISO : c'est nettoyer (tenir propre les outils, les équipements, l'atelier...)

SEIKETSU : c'est organiser (établir et formaliser des règles).

SHITSUKE : c'est maintenir la rigueur (respecter les règles).

V.18.4 Méthode KAIZEN

Le mot KAIZEN est la fusion des deux mots Japonais KAI et ZEN qui signifie respectivement « changement » et « bon ».

Le KAIZEN est un processus d'amélioration concrète, simples et peu onéreuses réalisées dans un laps de temps très court. Mais le KAIZEN est tout d'abord un état d'esprit qui nécessite l'amplification.

V.18.5 Méthode auto maintenance

Par définition l'auto maintenance est « la maintenance exécutée à l'endroit ou le bien est utilisé et par les personnes qui utilisent ce bien ».

Il s'agit avant tout de mettre en application des consignes permanentes de maintien de premier niveau des équipements.

L'auto maintenance est basée sur la responsabilisation des opérateurs de production vis-à-vis de leurs équipements de travail.

Chapitre VI :
Méthode d'analyse
et application

VI.1 Méthode AMDEC

Le mot AMDEC signifie l'**A**nalyse des **M**odes de **D**éfaillance de leurs **E**ffets et de leur **C**riticité. Est une méthode d'analyse prévisionnelle de la fiabilité pour faciliter l'examen critique de la conception dans un but d'évaluer et de garantir la sûreté, de fonctionnement (sécurité, fiabilité, maintenabilité et disponibilité).

L'AMDEC est une méthode rigoureuse de travail en groupe, très efficace grâce à la mise en commun de l'expérience et des connaissances de chaque participant, à condition toutefois que l'animateur AMDEC soit suffisamment expérimenté.

L'étude AMDEC permet principalement d'optimiser les coûts indirects. En effet elle constitue une méthode de diagnostic intelligente dans la mesure où elle permet de prévoir un certain nombre de faiblesses, de défauts, d'anomalies et de pannes au niveau de l'ensemble des éléments qui concourent à la fabrication d'un produit. [25]

L'AMDEC détermine donc :

- Le mode de défaillance qui est la manière par laquelle la défaillance qui est observée, et qui correspond à une perte totale ou partielle de fonctions assurées par le moyen.
- La cause potentielle de la défaillance qui est l'événement initial susceptible de conduire au mode de défaillance.
- L'effet que peut avoir le mode de défaillance sur le bon fonctionnement du moyen de production ou sur l'utilisateur final du moyen. Une défaillance est la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise (norme AFNOR expérimentale X60-500) (voir figure 58).

AMDEC réduit les coûts indirects (coûts d'indisponibilité) et amélioré la fiabilité des équipements dès la conception. Ce qui permet d'optimiser cette composante tout en identifiant les éléments les plus critiques et en aidant les décideurs de service maintenance. AMDEC se compose principalement par 3 types (voir la figure 56).

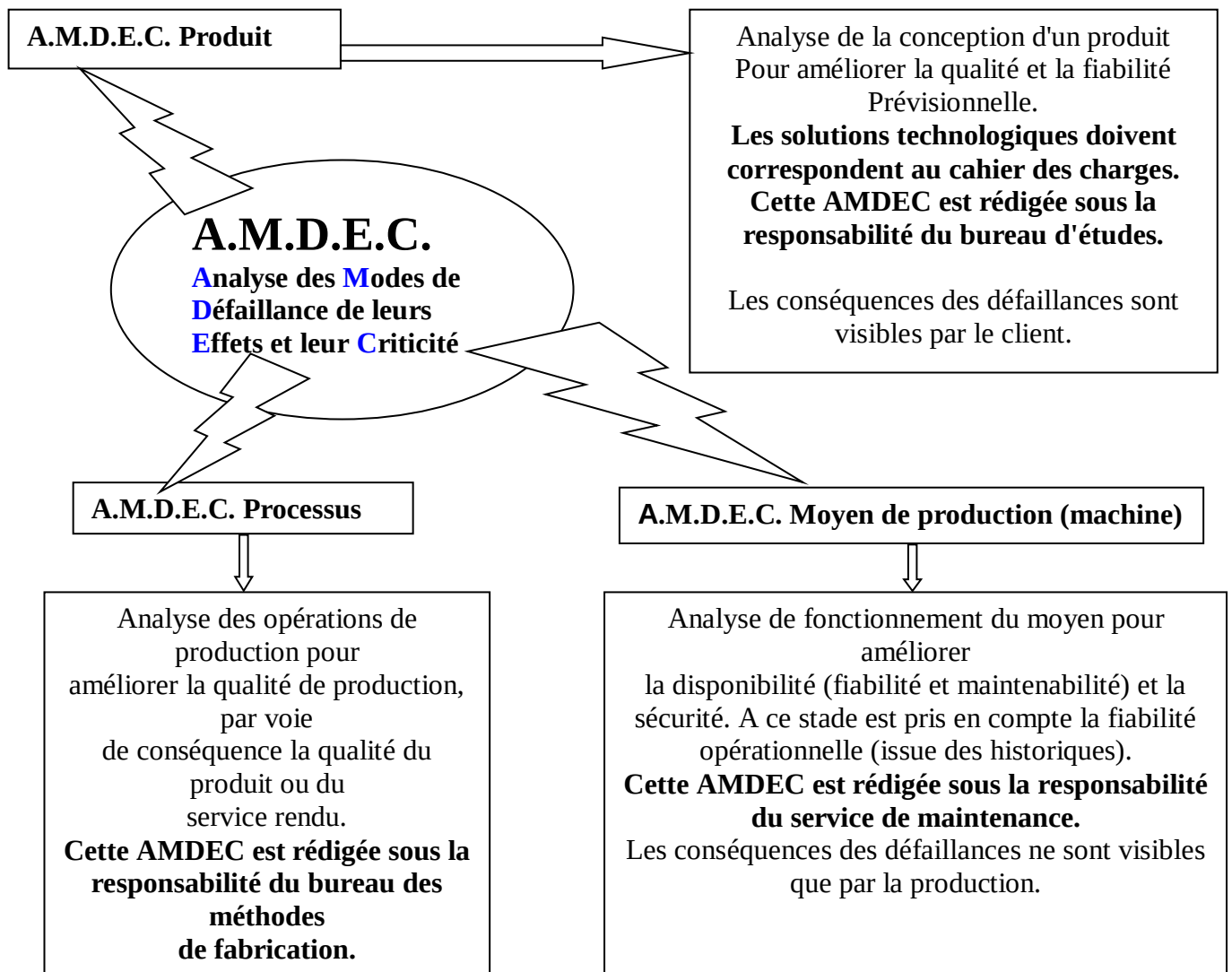


Figure 56 : Types de l'AMDEC.

L'étude AMDEC vise à : [29]

❖ **Augmenter la fiabilité :**

- Prévention des pannes
- Fiabilisation de la conception
- Amélioration de la fabrication, du montage, de l'installation
- Optimisation de l'utilisation et de la conduite
- Amélioration de la surveillance et des tests
- Amélioration de la maintenance préventive
- Détection précoce des dégradations

❖ **Augmenter la disponibilité :**

- Prise en compte de la maintenabilité dès la conception

- Amélioration de la testabilité
- Aide au diagnostic
- Amélioration de la maintenance corrective

❖ **Améliorer la sécurité :**

La puissance d'une étude AMDEC réside autant dans son contenu que dans son exploitation. Une étude AMDEC resterait sans valeur si elle n'était pas suivie par la mise en place effective des actions correctives préconisées par le groupe, accompagnées d'un contrôle systématique. Aussi, la mise en place des études décelées de l'AMDEC doit viser d'augmenter la sécurité des personnels et diminuer le travail nécessitant une force musculaire.

Il existe aussi l'AMDEC machine, qui est essentiellement destinée à l'analyse des modes de défaillance d'éléments matériels tel que : mécanique, hydrauliques, pneumatiques, électriques, électroniques. Elle peut aussi s'appliquer aux fonctions de la machine, au stade préliminaire de sa conception par exemple.

L'étude peut être prolongée par des travaux complémentaires tels que les calculs de fiabilité et disponibilité, l'élaboration de plans de maintenance et des aides au diagnostic.

VI.1.1 Processus de la méthode AMDEC

Le processus AMDEC se compose de quatre étapes essentielles : initialisation, Décomposition Fonctionnelle, Analyse AMDEC et la Synthèse (voir la figure 57).

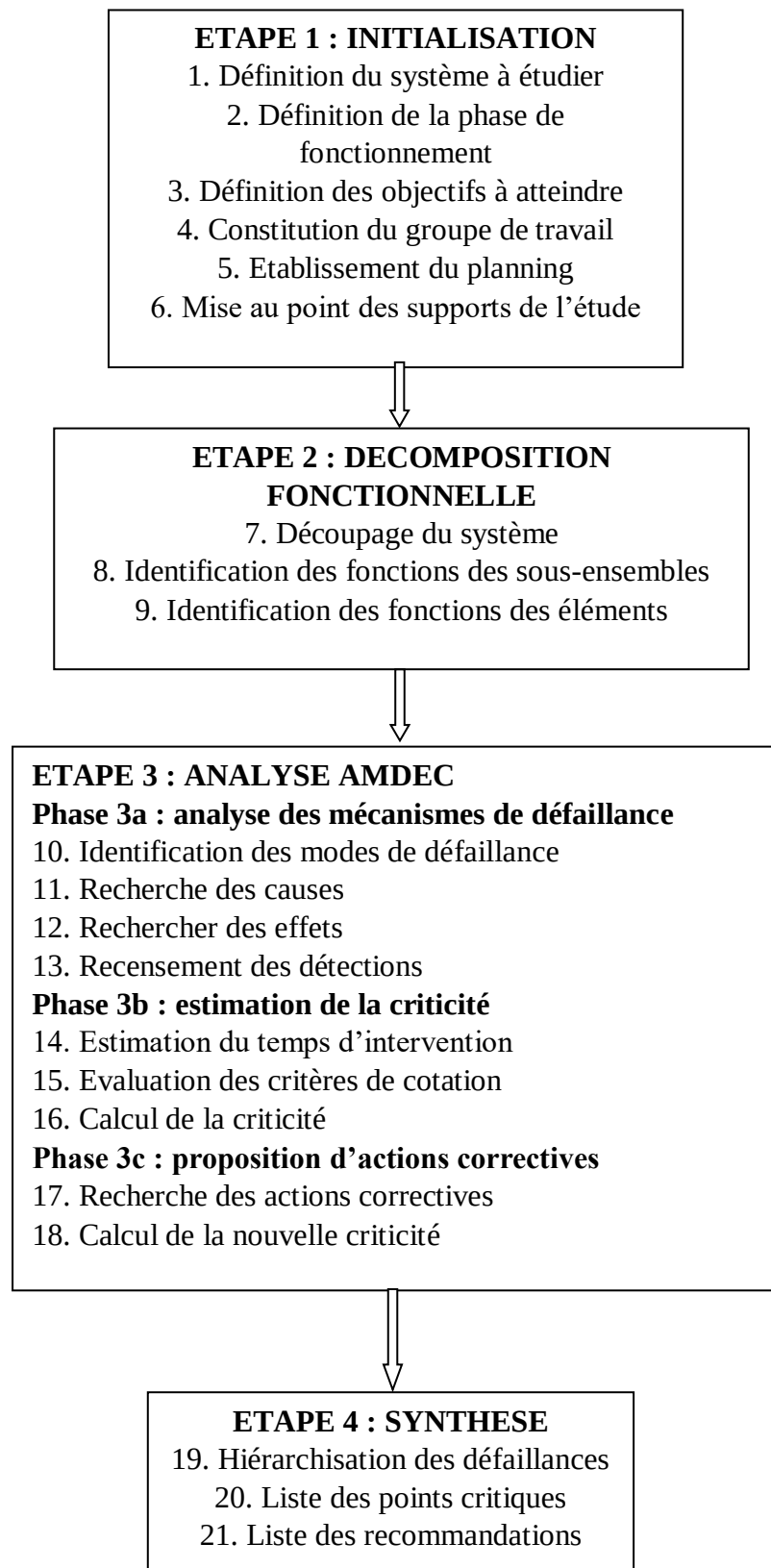


Figure 57 : Démarche pratique de l'AMDEC machine.

L'indice de fréquence (f) : Relatif à la fréquence d'apparition de la défaillance, cette fréquence exprime la probabilité combinée d'apparition du mode de défaillance par l'apparition de la cause de la défaillance. La fréquence F allant de 1 jusqu'à 4 (voir le tableau 21).

L'indice de détection (D) : Relatif à la possibilité de détecter la défaillance (le couple : Mode-Cause de défaillance) avant qu'elle ne produise l'effet. La détection D est évaluée de 1 pour une défaillance détectable, à 4 pour une défaillance indétectable (voir le tableau 19).

L'indice de gravité (G) : il se réfère à la gravité de l'effet de chaque défaillance, tel qu'elle a été ressentie par l'utilisateur. Doc cet indice est lié à l'effet de la défaillance (voir le tableau 20).

L'indice de criticité (C) : correspond au produit des indices cités plus haut, ceci dans le but de hiérarchiser les défaillances potentielles (voir le tableau 18). [24]

$$C = G \times F \times D$$

Tableau 18: Limites de criticité [24]

Niveau de criticité

$1 < C < 10$	- Aucune modification de conception
Criticité négligeable	- Maintenance corrective
$10 < C < 20$	- Amélioration des performances de l'élément
Criticité moyenne	- Maintenance préventive systématique
$20 < C < 40$	- Révision de la conception du sous ensemble et du choix des éléments
Criticité élevée	- Surveillance particulière, maintenance préventive conditionnelle / prévisionnelle
$40 < C < 64$	- Remise en cause complète de la conception
Criticité interdite	

	ANALYSE DES MODES DE D2FAILLANCE, DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE						AMDEC				
	Système :..... Sous-système :.....				Phase de fonctionnement ;.....		Date analyse :.....			Page :...	
	N°	Elément	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	Détection	Criticité			
							F	G	D	C	

Figure 58 : Exemple de feuille d'AMDEC. [14]

VI.1.2 Les grilles de cotation

Tableau 19: Grille de cotation de la probabilité de non détection (D).

Evidente	Dispositif (ou alarme) automatique, 1 détection sure de la cause.
Possible	Détection nécessitant l'intervention d'un 2 opérateur.
Improbable	Détection nécessitant un démontage ou 3 un appareillage.
Impossible	Aucun signe avant-coureur de la 4 défaillance.

Tableau 20: Grille de cotation de gravité (G).

Sans influence	1
Pas critique ou arrêt de production sans rebut	2
Critique ou arrêt de production et rebut	3
Très critique ou bris	4

Tableau 21: Grille de cotation d'occurrence (F).

Rare	Moins d'une défaillance par an	1
Possible	Moins d'une défaillance par trimestre	2
Fréquente	Moins d'une défaillance par semaine	3
Très fréquente	Plusieurs défaillances par semaine	4

VI.2 La maintenance appliquée sur TAG V94.3A [32]

VI.2.1 Les inspections de la machine TAG

Les activités d'inspection sur les turbines à gaz peuvent se diviser en trois sortes :

1. Inspections mineure

Elle devrait être exécutée chaque 8000 HOE (Heures Opérationnelles Equivalent). Cette inspection consiste principalement en un examen visuel des chambres de combustion, du premier et du quatrième stade de la turbine, du conduit gaz chauds, du système de filtrage air et du premier étage du compresseur (voir le tableau 22).

Tableau 22: Les inspections mineures (M) [32].

N°	ACTIVITES	AEN	CLIENT
1	Saisie des données d'exercice avant l'arrêt.		X
2	Débranchement du réseau, arrêt et refroidissement de la machine sur le vireur. Lavage hors ligne du compresseur.		X
3	Inspection visuelle externe, visant au contrôle de fuites de combustible, d'eau, d'huile et d'air des connexions, des tuyaux flexibles, des joints d'étanchéité, des manchons, etc.		X
4	Contrôles de L'intégrité de l'isolement, des instruments et des connexions électriques.		X
5	Ouverture des trous d'homme positionnent sur les composants à soumettre a inspection (conduite d'échappement, prise d'admission de L'air, chambres de combustion, partie inférieure de la bache extérieure).		X
6	Inspection visuelle des chambres de combustion et du 1er étage de la turbine.	X	
7	Contrôle des jeux des extrémités des aubes du 1 ^{er} étage de la turbine.	X	
8	Inspection visuelle de L'ensemble (ailettes) de turbulences axiales et diagonales, et des brûleurs (ceux accessibles).	X	
9	Inspection visuelle de la prise de L'air, du logement des filtres, du support du palier, des gicleurs du système de lavage du compresseur.	X	
10	Inspection visuelle des aubes directrices de L'air à pas variable du compresseur (IGV).	X	
11	Inspection visuelle sur le premier étage du compresseur (là où ils sont	X	

	accessible).		
12	Contrôle du jeu de l'éternité des aubes du 1er étage du compresseur.	X	
13	Conduit d'échappement gaz chauds - Inspection visuelle du conduit d'échappement et des bras.	X	
14	Inspection visuelle des aubes et des palettes du 4 ^{eme} étage de la turbine.	X	
15	Contrôle du jeu de l'éternité des aubes du 4 ^{eme} étage de la turbine.	X	
16	Inspection visuelle finale de l'unité pour détecter la présence d'éventuels objets étrangers laissés sur place.	X	
17	Fermeture des trous d'inspection et des trous d'homme a exécuté immédiatement après L'inspection visuelle finale.	X	
18	Assistance au démarrage de la turbine.	X	

2. Inspections de la trajectoire du gaz chauds (HGPI)

Le but de ce niveau d'inspections est d'examiner les pièces de la turbine les plus soumises aux contraintes par les températures élevée du système des gaz de combustion est limitée aux chambres de combustion, brûleurs inclus, à tous les étages de la TAG (avec substitution des étages prévus) à toutes les parties chaudes et au système de filtrage de l'air en entrée. L'on enlève seulement l'enveloppe de la turbine (voir le tableau 23).

Tableau 23: Inspection parcourt gaz chaud (HGPI).

		AEN	CLIENT
1	Saisie des données d'exercice avant l'arrêt. Analyse physique et chimique de l'huile de lubrification pour la certification de qualité		X
2	Débranchement du réseau, arrêt et refroidissement de la machine sur le vireur. Lavage hors ligne du compresseur.		X
3	Inspection visuelle externe, visant au contrôle de fuites de combustible, d'eau, d'huile et d'air des connexions, des tuyaux flexibles, des joints d'étanchéité, des manchons.		X
4	Vérification de l'intégrité du calorifugeage, des instruments et des connections électriques.		X

5	Démontage du calorifugeage, autant que nécessaire ; extraction des thermocouples, en aval de la turbine. En cas de nécessité, démontage de : tuyauteries, lignes électriques, connexions, auxiliaires.		X
6	Démontage du capotage d'insonorisation (y compris les tuyaux, les connexions électriques et les auxiliaires - exemple : système incendie).		X
7	Ouverture des trous d'homme positionnent sur les composants 8 soumettre 8 inspection (conduite d'échappèrent, prise d'admission de L'air, Chambres de Combustion Annulaire - C.C.A.).		X
8	Montage d'éventuels échafaudages.		X
9	Levée des tuyaux du combustible (seulement ceux des bruleurs qui empêchant le démontage des boulons de la C.C.A.)	X	
10	Contrôle des jeux des extrémités des aubes du compresseur (1 ^{er} étage) et de la turbine (1 ^{er} et 4 ^{eme} étage), avant l'ouverture des bâches.	X	
11	Inspection visuelle de la chambre de combustion annulaire - CCA (bâche extérieure avec ses carreaux et pièces d'insertion des bruleurs).	X	
12	Inspection visuelle de l'ensemble (ailettes) de turbulence, axiaux et diagonaux.	X	
13	Contrôles dimensionnel sur les zones accessibles de la chambre de combustion annulaire.	X	
14	Inspection visuelle de la prise de l'air, de logement des filtres, du support du palier, des gicleurs du système de lavage du compresseur.	X	
15	Inspection visuelle des aubes directrices de l'air 8 pas variable du compresseur (IGV).	X	
16	Inspection visuelle sur les premiers étages du compresseur (18ou ils sont accessibles).	X	
17	Inspection visuelle du boîtier de l'échappement et des bras.	X	

18	Ouverture de la bride d'enclenchement entre la bâche extérieure conique (bâche extérieure 2) et la bâche extérieure cylindrique (bâche extérieure 3).	X	
19	Levée des bruleurs qui empêchent le démontage de la machine.	X	
20	Levée de la partie supérieure de la bâche extérieure cylindrique (bâche extérieure 3).	X	
21	Démontage de la partie supérieure du porteur d'aubes de la turbine	X	
22	Contrôle des jeux axiaux et radiaux (des extrémités des aubes) de la turbine (par la turbine ouverte).	X	
23	Rotation et extraction de la partie inférieure du porteur d'aubes de la turbine, avec outil spécial.	X	
24	Inspection visuelle et nettoyage des surfaces de contact des bâches, des secteurs de distributeur, des dispositifs de centrage et des supports.	X	
25	Nettoyage, inspection visuelle et contrôle de l'allongement des boulons de bâche / porteurs.	X	
26	Démontage de toutes les palettes du stator de la turbine (TLe1 + TLe4).	X	
27	Nettoyage / sablage du porteur d'aubes de la turbine.	X	
28	Inspection visuelle du porteur d'aubes de la turbine.	X	
29	Nettoyage/sablage et CND des palettes du stator du 4ème étage de la turbine (TLe4).	X	
30	Nettoyage et inspection visuelle des bagues d'étanchéité du stator.	X	
31	Ré assemblage de toutes les palettes du stator de la turbine : 1er, 2ème et 3ème étage par le montage des palettes reconditionnées / neuves ; par le montage des palettes démontées et contrôlées pour le 4ème étage.	X	
32	Démontage de toutes les aubes du rotor de la turbine (TLa1 + TLa4); le rotor est lissée à l'intérieur du stator.	X	
33	Inspection visuelle des disques rotor (seulement dans les zones accessibles) et des bagues d'étanchéité.	X	
34	Nettoyage/sablage et CND des aubes du rotor du 4ème étage de la turbine (TLa4).	X	

35	Ré assemblage des toutes les aubes du rotor de la turbine : 1 ^{er} et 3eme étage en remplaçant les aubes par des aubes nouvelles / reconditionnés, 4eme étage : par le remontage des aubes démontées et contrôlées.	X	
36	Remise en place de la partie intérieure du porteur d'aubes de la Turbine.	X	
37	Meulage des aubes du rotor nouvelles reconditionnées.	X	
38	Contrôle des jeux axiaux et radiaux des extrémités des aubes de la turbine (par la machine ouverte).	X	
39	Ré insertion de la partie supérieure du porteur d'aubes de la turbine et serrage des boulons	X	
40	Remise en place et serrage des boulons de la partie supérieure de la bache extérieure cylindrique (bache extérieure 3).	X	
41	Centrage du porteur d'aubes de la Turbine.	X	
42	Contrôle des jeux des extrémités des aubes du 1er étage du compresseur et du 1er et 4 me étage la turbine (par la machine fermée).	X	
43	Ré assemblage des tuyaux et des, connexions électriques.	X	
44	Inspection visuelle et remise en état des thermocouples.	X	
45	Remise en état du calorifugeage.		X
46	Remise en état du capotage d'insonorisation (y compris les tuyaux, les connexions électriques et les auxiliaires - exemple : système incendie).		X
47	Essais fonctionnels (activités préalables a la mise en service) sur les aubes directrices de l'air IGV, sur les soupapes de purge et d'arrêt, sur les pompes de l'huile, de soulèvement et de lubrification, sur les détecteurs de la flamme.	X	
48	Démontage des échafaudages.		X
49	Inspection visuelle visant à détecter la présence d'éventuels objets étrangers laissés sur place.	X	
50	Fermeture des trous d'inspection et des trous d'homme.	X	

51	Contrôles I&C. Control de boucles sur les thermocouples et sur le système de protection contre les surtensions, essais fonctionnels sur la commutation entre pompes.		X
52	Contrôles et éventuel calibrage des instruments de mesure principaux.		X
53	Assistance au démarrage.	X	
54	inspection visuelle finale de la partie extérieure de la machine.	X	
55	Enregistrement des paramètres fonctionnels et des consignes modifiés.		X

3. Inspections Majeure (MI) [32]

Prévoit l'ouverture complète de tout le châssis de la turbine intérieur et extérieur et un examen soigneux de toutes les étapes, soit de la turbine soit du compresseur.

Une inspection générale doit être programmée et organisée selon les recommandations du manuel de maintenance fourni avec la turbine, et avec les résultats des inspections de la combustion et de la veine des gaz chauds, effectuée précédemment (voir le tableau 24).

Tableau 24: les inspections majeures (M).

N°	ACTIVITES	AEN	CLIENT
1	Saisie des données d'exercice avant l'arrêt. Analyse physique et chimique de l'huile de lubrification pour la certification de qualité.		X
2	Débranchement du réseau, arrêt et refroidissement de la machine sur le vireur. Lavage hors ligne du compresseur.		X
3	Inspection visuelle externe, visant au contrôle de fuites de combustible, d'eau, d'huile et d'air des connexions, des tuyaux flexibles, des joints d'étanchéité, des manchons.		X
4	Vérification de l'intégrité du calorifugeage, des instruments et des connections électriques.		X
5	Démontage du calorifugeage, autant que nécessaire ; extraction des thermocouples, en aval de la turbine ; démontage de tuyauteries, lignes électriques, connexions, auxiliaires.		X
	Démontage du capotage d'insonorisation (y compris les tuyaux,		X

6	les connexions électriques et les auxiliaires, exemple : le système incendie).		
7	Ouverture des trous d'homme positionnés sur les composants à soumettre a inspection (conduite d'échappement, prise d'admission de l'air, Chambres de Combustion Annulaire - C.C.A.).		X
8	Montage d'échafaudages.		X
9	inspection visuelle de la prise de l'air, de logement des filtres, du support du palier, des gicleurs du système de lavage du compresseur.	X	
10	Inspection visuelle des aubes directrices de l'air a pas variable (IGV).	X	
11	Inspection visuelle du premier étage du compresseur.	X	
12	Contrôle des jeux des extrémités des aubes du compresseur (1er étage) et de la turbine (1 ^{er} et 4eme étage) avant l'ouverture de la bâche.	X	
13	Désassemblage des tuyaux et des distributeurs du gaz.	X	
14	Démontage du carter de l'arbre moyen.	X	
15	Démontage du corps de palier cote compresseur et du cône d'admission.	X	
16	Levée partie supérieure du porteur d'aubes du compresseur (bâche extérieure 1) et de des aubes directrices de l'air a pas variable du compresseur (IGV).	X	
17	Levée des bruleurs et des pièces d'insertion qui empêchent le démontage de la machine.	X	
18	Levée des parties supérieures de la bâche extérieure cylindrique (bâche extérieure 3) et de la bâche extérieure conique (bâche extérieure 2) en même temps (enclenchées entre elles).	X	
19	Démontage du porteur du compresseur 2, partie supérieure.	X	
20	Démontage de la moitié supérieure du porteur d'aubes de la turbine.	X	
21	Démontage partie supérieure de la bâche extérieure de la C.C.A	X	

22	Démontage de la partie supérieure du palier coté compresseur.	X	
23	Contrôle axial et radial (extrémités) (par la machine ouverte)	X	
24	Déclenchement du joint et démontage du vireur.	X	
25	Déclenchement de la bride du rotor. Inspection visuelle des surfaces des boulons et des brides pour la détection d'éventuels endommagements.	X	
26	Extraction du rotor.	X	
27	Levée du coffrage d'échappement.	X	
28	Levée partie inférieure de la coque extérieure de la Chambre De Combustion Annulaire (C.C.A)	X	
29	Démontage de la moitié inférieure du porteur d'aubes de la turbine.	X	
30	Démontage des porteurs inférieurs du compresseur 2.	X	
31	Inspection visuelle de la chambre de combustion annulaire - C.C.A (coque intérieure et extérieure avec ses carreaux et pièces d'insertion des brûleurs).	X	
32	Inspection visuelle de l'ensemble (ailettes) de turbulence, axiaux et diagonaux et des correspondantes lignes du gaz, pré mixage et flamme pilote.	X	
33	Contrôles dimensionnels (épaisseurs, jeux etcetera) sur la Chambre de Combustion Annulaire (C.C.A).	X	
34	Inspection visuelle et contrôle dimensionnel des paliers. Inspection des thermocouples correspondants.	X	
35	Inspection visuelle et, en cas de nécessité, nettoyage des surfaces de contact des bâches, des dispositifs de centrage et des supports.	X	
36	Nettoyage, inspection visuelle et contrôle de, l'allongement des boulons de la bâche / des porteurs.	X	
37	Démontage de toutes les couronnes des palettes du compresseur.	X	
38	Nettoyage/sablage des couronnes des palettes sans revêtement du compresseur.		X
39	Nettoyage des couronnes des palettes du compresseur revêtues.		

	Inspection visuelle et contra le non destructif (CND) sur toutes les couronnes du compresseur.	X	
40	Démontage de toutes les palettes du stator de la turbine (TLe1 + TLe4).	X	
41	Nettoyage et inspection visuelle des bagues d'étanchéité de la turbine.	X	
42	Nettoyage du porteur d'aubes du compresseur 1, partie inférieure, sablage du porteur d'aubes de la turbine et du porteur d'aubes du compresseur 2.	X	
43	Inspection Visuelle du porteur d'aubes de la turbine et des porteurs du compresseur 1, et 2.	X	
44	Ré assemblage de toutes les palettes du stator de la turbine : (1er au 4ème) par le remontage des palettes neuves / reconditionnées.	X	
45	Remise en place de toutes les couronnes des palettes du compresseur.	X	
46	Démontage de toutes les aubes du rotor de la turbine (TLa1 + TLa4).	X	
47	Nettoyage des aubes du compresseur revêtues. Inspection visuelle et contrôle CND sur toutes les aubes du rotor du compresseur.	X	
48	Ré assemblage de toutes les aubes du rotor de la turbine : (1er au 4eme) par le remontage des palettes neuves / reconditionnés.	X	
49	Démontage de la partie inférieure du palier côté compresseur ; Démontage du palier côté turbine.	X	
50	Inspection visuelle, contrôle CND et contrôle dimensionnel et des jeux sur les paliers.	X	
51	Réinstallation de la partie inférieure du palier cote compresseur, et des bagues d'étanchéité.	X	
52	Réinstallation du palier cote turbine sur la bêche d'échappement,	X	
53	Réinstallation de la bêche d'échappèrent sur le rotor.	X	
54	Réinstallation de la partie inférieure du porteur d'aubes de la	X	

	turbine.		
55	Réinstallation bâche compresseur 2 intérieure et bâche extérieure de la Chambre de Combustion Annulaire.	X	
56	Remise en place du rotor (avec la bâche intérieure de la C.C :A. sur le même) dans les parties du stator.	X	
57	Meulage, des aubes neuves I reconditionnés.	X	
58	Contrôles des jeux d'extrémité et axiaux par les bâches ouvertes.	X	
59	Inspection visuelle du diffuseur de sortie du compresseur.	X	
60	réinstallation de la bâche supérieure 2 du compresseur.	X	
61	Réinstallation de la bâche supérieure de la Chambre de Combustion Annulaire.	X	
62	Remise en place du porteur d'aubes supérieure de la turbine	X	
63	Réinstallation de la bâche extérieure cylindrique (bâche extérieure 3) et de la bâche extérieure conique (bâche extérieure 2) en même temps (enclenchées entre elles	X	
64	Remise en place du dispositif IGV.	X	
65	Inspection visuelle de la conduite d'échappement et des bras.	X	
66	Inspection visuelle des trous d'homme.	X	
67	Réinstallation de la C.C.A. complète, y compris bruleurs et pièces d'insertion correspondants ; serrage des boulons.	X	
68	Réinstallation de la partie supérieure e la bâche 1 du compresseur	X	
69	Réinstallation des lignes de distribution du gaz et du combustible	X	
70	Centrage du porteur d'aubes de la turbine. Contrôle du décentrage du rotor et contrôle de l'alignement. Remontage sur les brides du rotor.	X	
71	Ré assemblage du palier cote compresseur, du cône d'admission et du carter de l'arbre moyen.	X	
72	Inspection visuelle et ré installation du vireur	X	
73	Contrôles des jeux d'extrémités des aubes du compresseur (1 er étage) et de la turbine (1 ^{er} et 4eme étage) après la fermeture de la	X	

	bâché.		
74	Ré assemblage des tuyaux, des connexions électriques, etc.	X	
75	Inspection visuelle et réinstallations des thermocouples à l'échappement.	X	
76	Réinstallation du calorifugeage.		X
77	Réinstallation du capotage d'insonorisation (y compris les tuyaux, les connexions électriques et les auxiliaires - ex : système incendie).		X
78	Essais fonctionnels (activités préliminaires à la mise en service) sur les IGV, les soupapes de purge et d'arrêt, les pompes de soulèvement et de lubrification de l'huile, les détecteurs de flamme.	X	
79	Démontage de l'échafaudage.		X
80	Inspection visuelle visant à détecter la présence d'objets étrangers laisse sur place.	X	
81	Fermeture des trous d'hommes et des fenêtres d'inspection et trous d'homme.	X	
82	contrôles I&C. Contrôle de boucle sur les thermocouples de l'échappement et sur le système de protection contre les surtensions, essais fonctionnels de la commutation des pompes.		X
83	Contrôles et calibrage éventuel des instruments de mesure principaux.		X
84	Assistance au démarrage.	X	
85	Inspection visuelle finale de l'extérieur.	X	
86	Enregistrement des paramètres fonctionnels et des réglages modifiés.		X

VI.3 Interprétation des résultats de l'AMDEC

VI.3.1 Application de la méthode AMDEC sur les inspections 2021

Eléments	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	Détection	Action	F	G	D	C		Type d'intervention
Ventilateur aéro huile de graissage	Refroidissement de l'huile	Courroie détendue	Mode du démarrage du moteur (démarrage direct)	Arrêt du ventilateur suite à la rupture de la courroie	Grincement et bruit de sifflement	Changement des courroies	3	2	2	12	M O Y	MPC
Moteur vent aéro-refrigerant	Refroidissement de l'alternateur	Roulement du moteur	Usure de roulement	Blocage et arrêt du moteur	Présence de gros bruit et de vibrations dans le moteur	Changement des roulements mesure vibrations	1	3	4	12	M O Y	MPC
Chambre de combustion	Combustion	Défaut surveillance flamme persiste	Fuite des gaz chauds	Perte détection flamme l'instrument est détérioré suivi d'un déclenchement de la turbine à gaz	Présence d'Alarme au niveau du système contrôle commande	Changement détecteur de flamme, Mise en place d'un refroidissement forcé par un ventilateur pour diminution des gaz chauds.	1	4	3	12	M O Y	MCO

Chambre de combustion	Combustion	Fuite fuel sur conduite de drainage coté trou d'homme de la chambre combustion	Usure des vannes (présence de la fuite au niveau de la vanne)	Déclenchement du la turbine	Inspection visuelle de l'exploitant durant l'essai du démarrage au fuel	Changement de la vanne d'alimentation au fuel	1	3	2	6	NE G	MPC
Tuyauterie gaz chambre de combustion	Combustion	Fuite gaz niveau du collecteur gaz pilote bruleur	Usure des conduites	Déclenchement du la turbine	Détecteur de fuite gaz	Soudage de la conduite gaz du collecteur	2	4	1	8	NE G	MCO
Compresseur pneumatique (système de protection anti-pompage)	Production de l'air comprimé afin de garder les soupapes anti pompage du compresseur turbine fermé durant le fonctionnement de la turbine	Refus démarrage compresseur n°1 du GR3	Echauffement du compresseur	Fonctionnement de la protection contre les surcharges et arrêt du compresseur	Contrôle de La page des courbe du démarrage et d'arrêt des compresseurs sur système de contrôle de commande T3000	Attente de refroidissement du compresseur	1	2	3	6	NE G	MPC
Ventilation salle des machines	Refroidissement salle machine (turbine/alternateur)	Moteur	défaut d'isolement moteur triphasé	Arrêt du ventilateur suite endommagement moteur	Par protection disjoncteur	refaire bobinage enroulement moteur	2	3	3	18	M O Y	MPS

Transformateur principale 260 MWA	Transformation 15kv/220kv	endommagement d'enroulement primaire transformateur défaut interne	surchauffe se développe à l'intérieur des enroulements	Alarme et déclenchement de la turbine	Relais Buchholz	refaire bobinage enroulement	1	3	3	6	NE G	MPS
Ventilation aspiration capotage turbine	Ventilation	défaillance des joint	échange standard	Aucune conséquence	Bruit	Changement du joint de dilation	2	2	3	12	M O Y	MPS
Filtre	Filtration	filtre encrassé	poussières dans l'air ambiant	capacité de filtration diminue et sa pression augmente.	Capteur de l'air	Nettoyage filtre	4	2	3	24	EL EV	MPC
Soupape a solénoïde	Contrôle, commander l'entrée et la sortie	Disfonctionnement Soupape	Défaillance dans le system de commande des ressorts	peuvent présenter des fissures ou des craquelures.	Capteur	-soupape en marche sans défauts apparents et sans fuite d'air -signalez le problème si la led bleu s'allume	1	2	1	2	NE G	MPC
Système lavage compresseur	Régulation	Fuite d'eau au niveau de la tuyauterie système eau de lavage compresseur	Défaillance au niveau de la tuyauterie	Aucune conséquence	Visuel	Soudage de perçement serrage des raccords	2	1	2	4	NE G	MCO
Alternateur	Convertir l'énergie mécanique on énergie électrique	Problème de la pompe d'huile étanchéité	Les impuretés d'huile	Arrêt de production	capteur	Est redevenue Stable On a cassé le vide	1	3	3	9	NE G	MCO

Diesel de secours	Secourir	Fuite d'huile au niveau diesel	Défaillance de bloc moteur Segmentation	Aucune conséquence	Visuel	Appoint avec 25l d'huile	1	3	3	9	NE G	MCO
Soupape contrôle fuel-oil retiré	Contrôle	Apparition du vapeur gasoil au niveau de trappe avec Gasoil GR3	Pas de signale de niveau de fuel-oil	Aucune conséquence	Visuel	Aucune vapeur n'a été détectée Probabilité de reste de fuel dans la conduite après l'essai fuel reste on observation	1	2	1	2	NE G	MPC
Câbles	Transporté les signaux électriques	En dommage	La température	Aucun accès des informations	Visuel (voltmètre)	Changement des câbles	1	2	2	4	NE G	MPS
Les paliers	Basé l'arbre de la turbine	L'usure	Impureté dans l'huile de graissage	Crée les vibrations	Visuel ou par CND	Renouveler le régule des paliers Contrôler l'alignement des paliers	4	4	2	32	EL EV	
Les ailettes	Tourner la turbine	Usure Déformation	Gouttes d'eau et phénomène de cavitation	Vitesse de rotation	Visuel	Changement de la pièce	2	3	4	24	EL E	MPS
Les garnitures d'étanchéités	Limiter les pertes par les fuites	Usure	Les impuretés d'huile	Pert de pression et de la vapeur	Visuel	Changement de la pièce	2	4	3	24	EL EV	MPS

VI.3.2 Recommandation

Le choix du type d'action corrective à mettre en place doit être guidé par le critère le plus pénalisant dans la note de criticité par exemple :

- Si la criticité d'une défaillance est élevée du fait de la fréquence, l'action corrective doit viser à la diminuer la fréquence.
- Quand aucune action corrective ne peut permettre de ramener l'indice de gravité, au-dessous de 4. Il faudrait définir une action visant à maintenir les deux autres critères (fréquence, détection) à une valeur égale à 1.
- De la même manière, quand aucune action corrective ne permet de ramener l'indice de fréquence au-dessous de 4. Il faudrait définir une action corrective qui permet de ramener la gravité et la détection à une valeur égale à 1.

VI.4Essai Diesel

Le groupe diesel est un dispositif de lancement de secours, c'est pourquoi on le contrôle périodiquement pour assurer sa fiabilité.

VI.4.1Procédure de contrôle périodique du diesel de secours**20XJP01AA031**

Afin de maintenir une pression de 8 bar à la sortie du détendeur d'air 20XJP01AA031 du système de lancement (voir le tableau 25), il faut procéder au contrôle périodique du détendeur d'air 02 fois par semaine ; 01 fois avant l'essai hebdomadaire du diesel de secours prévu chaque lundi matin et 01 fois chaque jeudi matin comme suit :

- 1- Fermer la vanne sortie ballon compresseur 20XPJP01AA003.
- 2- Ouvrir la vanne sortie de drainage du manomètre de pression sortie détendeur jusqu'à ce que la pression atteigne 0 bar.
- 3- Fermer la vanne de drainage du manomètre de pression sortie détendeur d'air.

Tableau 25: Essai Hebdomadaire du diesel de secours pour le 23/05/2022.

	Avant démarrage	0MW	2MW	4MW
Moteur				
T° cylindre A1	28	226	438	440
T° cylindre A2	28	216	477	488
T° cylindre A3	28	234	470	426
T° cylindre A4	28	219	479	487
T° cylindre A5	29	224	454	462
T° cylindre A6	29	216	473	486
T° cylindre A7	29	201	469	477
T° cylindre A8	29	241	451	465
T° cylindre B1	28	259	486	471
T° cylindre B2	28	251	516	497
T° cylindre B3	29	210	432	450
T° cylindre B4	29	076	51	057
T° cylindre B5	29	243	493	492
T° cylindre B6	29	235	416	481
T° cylindre B7	30	201	427	441
T° cylindre B8	29	262	490	480
T° entrée A1	28	196	540	583
T° entrée B1	29	203	522	530
T° sortie A1	28	166	427	424
T° sortie B1	29	163	407	385
Alternateur				
T° enroulement 1	30	34	38	43
T° enroulement 2	29	30	36	41
T° enroulement 3	30	31	37	42
T° palier 1	24	27	32	34
T° palier 2	36	38	44	47

Autres paramètres

Fuel oil pressure 1,8

Air boost pressure 0

Lubrification oil
pressure

Jacket water 0,8
pressure

On remarque que dans le cylindre B4 est hors service ce qui veut dire que le capteur de température est défaillant, qui prescrire de remplacer le capteur.

Pression d'air ballon compresseur : 26 bars

Pression d'air détenteur: 8.5 bar (voir annexe F).

Index heures de démarrage : 530.2 h

Température ambiante : 26 °c

Température d'huile : 42°c

Température d'eau de refroidissement : 20°c

VI.5 Inspection de la TGM 2022 [31]

ID	Nom de la tâche	Intervention	Durée	Start	Finish
	HAMMA TGM		6 days	Sun 2/13/22	Fri 2/18/22
	Partie mécanique		3 jours	Sun 2/13/22	Tue 2/15/22
1	Installation de l'outil entraîneur du rotor.	Inspection Borescopique	1 jour	Sun 2/13/22	Sun 2/13/22
2	Inspection du compresseur axial	Inspection Borescopique	2 jours	Sun 2/13/22	Mon 2/14/22
3	Inspection de la chambre à combustion	Inspection Borescopique	1 jour	Sun 2/13/22	Sun 2/13/22
4	Inspection de HPT	Inspection Borescopique	1 jour	Mon 2/14/22	Mon 2/14/22
5	Inspection TM	Inspection Borescopique	1 jour	Mon 2/14/22	Mon 2/14/22
6	Inspection de la PT	Inspection Borescopique	1 jour	Tue 2/15/22	Tue 2/15/22
7	Serrage des ports inspecté	Inspection Borescopique	1 jour	Tue 2/15/22	Tue 2/15/22
8	Inspection de l'état général de la machine	Visuelle	2 jours	Sun 2/13/22	Mon 2/14/22
9	Vérification d'admission	Visuelle	1 jour	Sun 2/13/22	Sun 2/13/22
10	Inspection du système de ventilation	Visuelle	1 jour	Sun 2/13/22	Sun 2/13/22
11	Graissage des aéroréfrigérants A&B.	Mécanique	1 jour	Mon 2/14/22	Mon 2/14/22
12	Vérification visuelle d'échappement	Visuelle	1 jour	Mon 2/14/22	Mon 2/14/22

13	Graisser la pompe attelée du générateur	Mécanique	1 jour	Mon 2/14/22	Mon 2/14/22
	Partie électrique		3 jours	Sun 2/13/22	Tue 2/15/22
14	Inspection de l'état général du générateur	Visuelle	2 jours	dim 2/13/22	lun 2/14/22
15	Vérification du disjoncteur G52	Visuelle	1 jour	dim 2/13/22	dim 2/13/22
16	Mesure d'impédance & isolement main/pilote excite	Mesure	2 jours	dim 2/13/22	lun 2/14/22
17	Mesure de résistance main/pilot excite	Mesure	1 jour	lun 2/14/22	lun 2/14/22
18	Graissage des moteur A&B des aéroréfrigérant	Electrique	1 jour	lun 2/14/22	lun 2/14/22
19	Démontage ventilateur n°6 du TP 11,5KV/63KV	Electrique	1 jour	lun 2/14/22	lun 2/14/22
20	Vérification des batteries et Essai décharge batteries	Electrique	2 jours	dim 2/13/22	lun 2/14/22
21	Nettoyage bloc des diodes	Electrique	1 jour	mar 2/15/22	mar 2/15/22
	Partie instrumentation		3 jours	dim 2/13/22	mar 2/15/22
22	Calibration des détecteurs de Gaz.	Test	1 jour	dim 2/13/22	dim 2/13/22
23	Test du système F&G	Test	1 jour	lun 2/14/22	lun 2/14/22

24	Simulation du Fire and Gas	Test	1 jour	lun 2/14/22	lun 2/14/22
25	Simulation de l'overspeed	Test	1 jour	lun 2/14/22	lun 2/14/22
26	Vérification et test des bougies d'allumage	Test	1 jour	dim 2/13/22	dim 2/13/22
27	Vérification des thermocouples T48	Test	1 jour	lun 2/14/22	lun 2/14/22
28	Vérification et test des MCD's	Test	1 jour	dim 2/14/22	dim 2/14/22
29	Test des RTD	Test	1 jour	dim 2/13/22	dim 2/13/22
30	Vérification des détecteurs flamme	Test	1 jour	lun 2/14/22	lun 2/14/22

VI.6 Conclusion

AMDEC peut être utilisée efficacement pour déclencher les actions curatives et préventives, à partir de défaillances réelles observées. On optimise donc l'action en ne s'intéressant qu'aux éléments qui sont responsables des coûts très élevés d'indisponibilité de matériel, là où l'AMDEC nous permet d'améliorer la fiabilité des équipements, voire réduire les coûts indirects de la maintenance.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'art de l'ingénieur vise à améliorer le rendement des procédés qu'il met en œuvre, C'est à dire à tirer un maximum de profits d'un minimum de ressources.

Ce présent travail nous a permis de connaître les caractéristiques et la structure de la turbine à gaz, et de bien comprendre son fonctionnement et son nécessité d'utilisation dans le domaine de production électrique.

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 par utilisation des méthodes efficaces.

La méthode AMDEC est un plus qu'un outil d'analyse. Il est le révélateur des dangers qui peuvent affaiblir l'organisation des entreprises et dont les conséquences peuvent être bénignes ou mettre en péril l'ensemble.

L'AMDEC vise à satisfaire le client par la prévention des défaillances à tous les niveaux de la conception contribuant ainsi à l'amélioration de la qualité et de la fiabilité du sujet abordé.

L'application de l'AMDEC, nous a permis de classer et d'hiérarchiser les défaillances selon leur criticité et de préciser les actions correctives de chaque classe de criticité.

A la fin Dans notre travail, nous avons élaboré des recommandations pour améliorer le plan de maintenance préventive, ces recommandations sont principalement basées sur la réduction de l'occurrence des pannes et donc la réduction de criticité.

Le stage que nous avons entrepris au niveau de la centrale électrique d'elHamma II est très bénéfique sur plusieurs plans tant en un apport supplémentaire en connaissances pratiques et aussi sur le monde du travail en milieu industriel.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]ANSALDO ENERGIA, Manuel de formation Turbines à gaz V94.3A 2*209 MW, HAMMA, Tome I, sonelgaz, 2003.
- [2] ALSTOM (Switzerland) Ltd, « Vue d'ensemble centrale électrique à turbine à gaz », cours de formation, 2008, <https://www.scribd.com>.
- [3] ANSALDO Energia S.P.A, « Turbine à gaz V94.3A », Manuel de formation tome 2, 2001, SONEGAZ. SPE Centrale HAMMA II.
- [4]ANSALDO ENERGIA, Manuel de formation Turbines à gaz V94.3A 2*209 MW, HAMMA, Tome I, sonelgaz, 2003.
- [5] <http://staff.univ-batna2.dz> > files > serir_lazhar > files
- [6]JAN-KAYSINSKI : Turbomachine, théorie générale O.P.U, 1986.
- [7]Turbomachines hydrauliques et thermiques, Tome I : aérodynamique générale (calcul et fonctionnement) Masson & Cie, 1973.
- [8]Technique de l'ingénieur, traité.
- [9]Génie mécanique. Réf : BM4283 v2.
- [10] Melle. L. BOUSSOUAR Mr. S. NEDJIMI, ' Etude de la transformation du groupe 1 de la centrale Cap-Djenet en cycle combiné', université Mouloud Mammeri, TIZI OUZOU.
- [11] Fiche sonalgaz.
- [12] TAMIMOUNT AMINE, ' Effet de la variation des paramètres économiques sur la rentabilité des turbines à gaz et des cycles combinés', université Boumerdes.
- [13] P. Stouffs, SHavery, 'Thermodynamique Appliquée : Cycles Thermodynamiques Moteurs 2000/2001, cours données dans le cadre de l'école doctorale EDDDED 2007/2008.
- [14] SONEGAZ manuel de formation tome 2 la turbine à gaz siemens V93.A4. Février 2001.
- [15] B. KODJA problème de thermodynamique et de gazodynamique. 1971
- [16] A. Benidir, « calcul énergétique de l'installation hybride thermique pour la production d'électricité » .mémoire de fin d'étude de master en système énergétiques et développement durable. Université de Mohamed Khider_Biskra. (juin 2013)
- [17] Max GIRAUD et Joël SILET, technique de l'ingénieur, Turbines à gaz aéronautiques et Terrestres, B 4410. Octobre 1992
- [18] Hachemi Tayeb, 'Analyse des systèmes de transport du gaz naturel en Algérie et contribution à l'amélioration des performances des turbines à gaz', mémoire de magister, université de Boumerdes.

Références bibliographiques

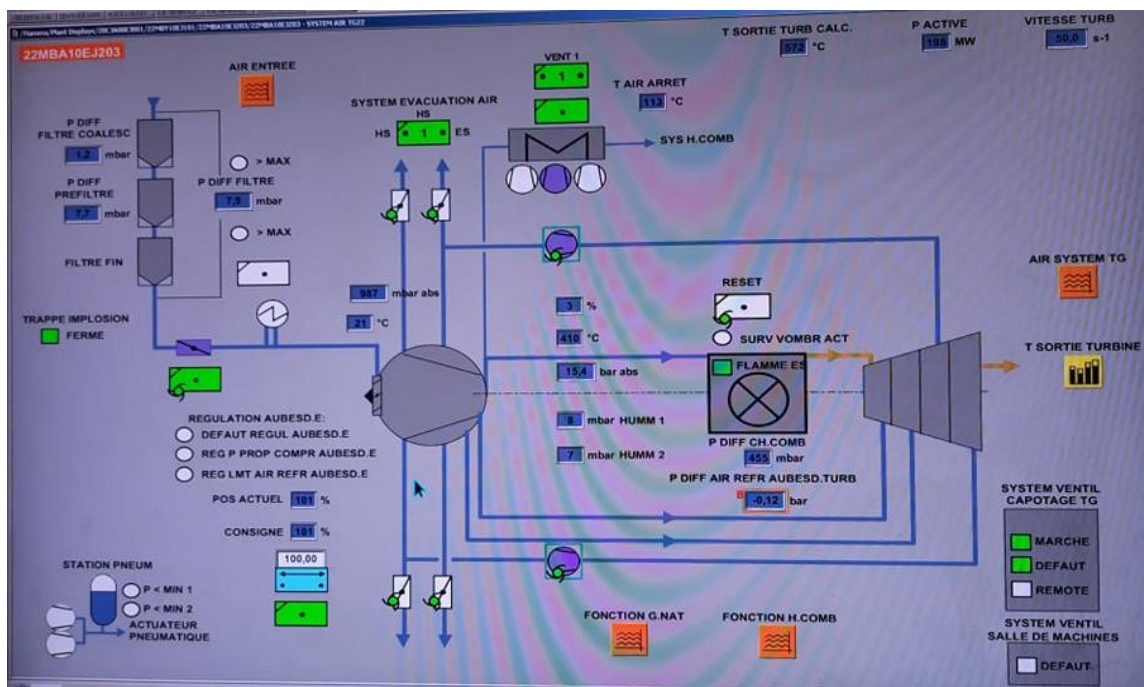
- [19] MAOUNI AMIR MAY CHAFIK 'Etude et rénovation de la turbine a Gaz ms5002 de hassir'mel', mémoire de fin d'étude, université Abderehmane Mira Béjaia.
- [20] ALBIN MICHEL,'Classification des turbines à vapeur et turbine à gaz', LUCIEN VIVIER-EDITION (1965).
- [21] JEAN HENG 'Pratique de la maintenance préventive'4^e édition, DUNOD, 2002, 2005, 2011,2017.
- [22] AMIRA Messaoud, BOULECHEFAR Aissam, 'Optimisation et amélioration de la maintenance par la fiabilité Cas d'une turbine d'une centrale électrique, mémoire de fin d'étude, université Mohammed Seddik Ben Yahia – Jijel.
- [23] HerzallahFayssal,' Etude Energétique et Maintenance d'une Turbine à gaz LM2500, mémoire de fin d'étude, Université de Biskra.
- [24] MalloulSmail ,MengchicheZahir , 'étude thermodynamique et maintenance préventive d'une turbine à gaz MS5002c, université UMMTO.
- [25] ABDI Adil, OPTIMISATION DE LA FONCTIONMAINTENANCE PAR LA METHODE AMDEC, mémoire de fin d'étude, universiteaboubekrBelkaid , Tlemcen.
- [26] <http://www.maintenance-preventive.com/methode-presentation-1.html>.
- [27] <http://www.qualiteperformance.org/lexique/diagramme-pareto>
- [28] <https://www.manager-go.com/management-de-la-qualite/methode-5s.htm>
- [29] Anas Solhy Mohamed Amine Boulazaib, 'AM2LIORATION DE LA FIABILITE DES ENGINS MINIER'S' éditions universitaires européennes.
- [30] Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique 8 km route d'Eljadida BP 8118 Oasis Casablanca
- [31] Documentations SPE.
- [32] 2021_02_01_Courriel à SPE-Planning différents inspections.

Annexes

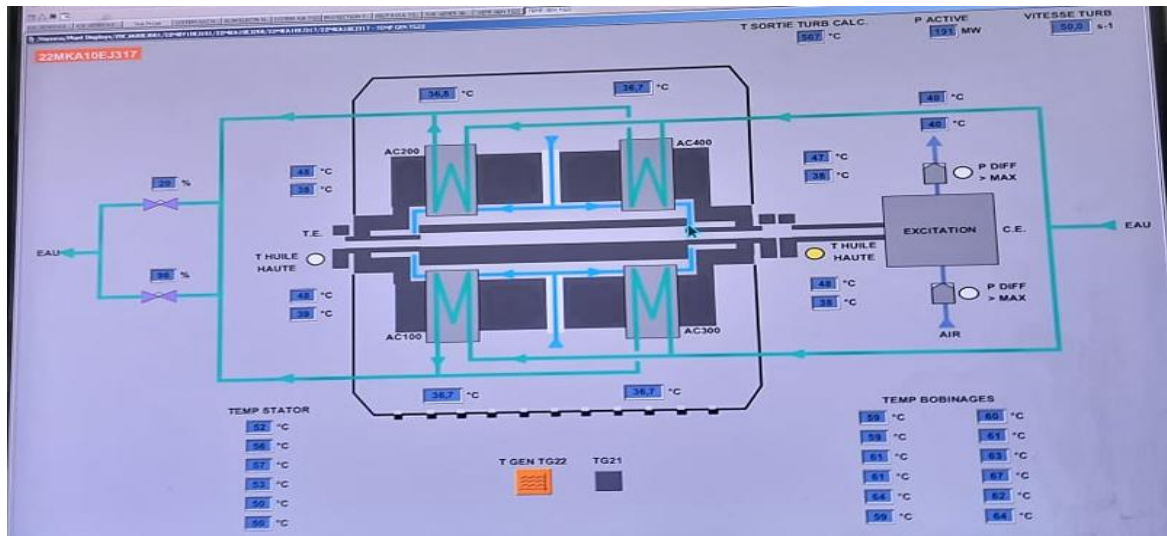
Annexe A

ANSALDO									
Ansaldo Energia s.p.a.									
GENERATEUR SYNCHROME - Fabriqué en ITALIE									
ACTHR-L45		Serial Number 2510				Manufacture Year 2007			
Capacité		270000 kVA							
Pression absolue H ₂		400 kPa							
Facteur de puissance		0,8							
Tension		15750 V ±7,5%							
Courant		9897 A ±7,5%							
Excitation		2700 A	343 V						
Niveau de service		S1							
Fréquence 50 Hz		Nombre de poles 2		Triphasé c.a.		Connexion 			
Vitesse		3000 tours/min.		Survitesse		3600 tours/min.			
Moment d'inertie (J)		6500 Kgm ²		Rotation Horaire observateur côté turbine					
Classe d'isolation stator et rotor F				Classe d'échauffement stator et rotor B					
Température froide H ₂		40 °C		Echauffement stator et rotor				60/80 K	
Normes C.E.I. 34-1 (1996) - C.E.I. 34-1 (1988)									
Genova - Italia									

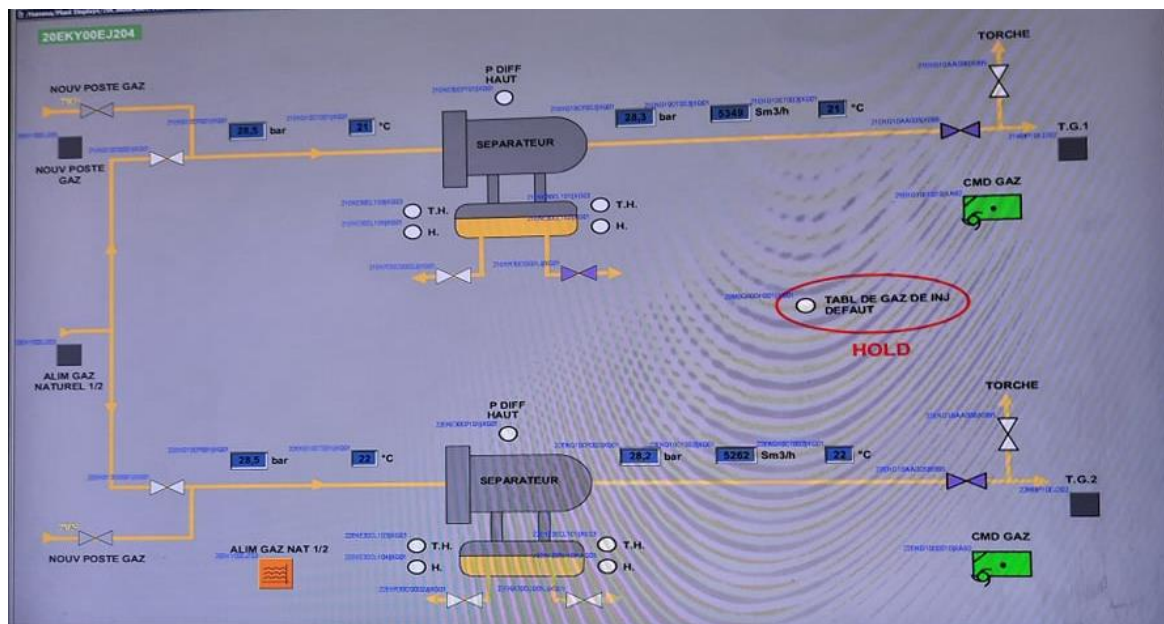
Annexe B



Annexe C



Annexe D



Annexe E



Annexe F

