

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE
FILIERE DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences & Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Spécialité : Maintenance Industrielle

THÈME

Analyse FMD De La Turbine À Gaz A Deux Arbres

Type : MS5002B

Préparé par: - BENKAHLA Mohamed
- ZERIG Hakim

Devant le Jury :

| Nom et prénom | Lieu d'exercice | Qualité |
|-----------------------------|------------------------|----------------|
| Mr : Athmani Mohamed | UIK Tiaret | Président |
| Mr : Debihe Snoussi | UIK Tiaret | Examineur |
| Mr : Madani Ahmed | UIK Tiaret | Encadreur |

PROMOTION 2016/2017

Dédicace :

J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail :

A ceux qui m'ont encouragé et soutenu moralement et matériellement
pendant les moments plus difficiles Durant ma vie.

A mes très chers parents : ma mère et mon père, qui me donne toujours
l'espoir

A mon frères: abed eldjilile et mes sœurs: samira douaa

A toute ma famille: ZERIG

A mon binôme: MOHAMMED

A mes amis: khaled - mohammed - mabrouk - slimane - amine - chikhe

A tous mes camarades de la classe de la promotion de Génie
Mécanique (2016-2017)

A la fin je dédie très chaleureusement

Mr: madani

Sommaire:

| | |
|---------------------------|---|
| INTRODUCTION | 1 |
|---------------------------|---|

CHAPITRE I : Généralité sur les turbines a gaz

| | |
|--|----|
| I.1.Historique de la turbine a gaz | 2 |
| I.2.Définition | 2 |
| I.3.Principe de fonctionnement..... | 3 |
| I.4.Les éléments principaux d'une turbine à gaz..... | 4 |
| I.4.1.Compresseur..... | 4 |
| I.4.2. Section de combustion..... | 5 |
| I.4.3.Section de la turbine..... | 6 |
| I.5.Classification des turbines a gaz..... | 6 |
| I.5.1. D'après le mode de construction..... | 6 |
| I.5.2. D'après le mode de fonctionnement thermodynamique. | 7 |
| I.6.Différents types de turbines..... | 8 |
| I.6.1.Turbines à gaz dérivées de l'aviation | 8 |
| I.6.2.Turbines à gaz industrielles | 9 |
| I.7.Principales utilisations..... | 11 |
| I.7.1. Production d'électricité..... | 11 |
| I.7.2. Production combinée chaleur-force..... | 11 |
| I.7.3. Pompage et compression..... | 11 |
| I.8.Avantages et inconvénients des turbines à gaz..... | 11 |
| I.8.1. Avantages..... | 11 |
| I.8.2. Inconvénients..... | 12 |
| I.9.Turbine a gaz type MS5002b..... | 12 |
| I.9.1.Caractéristiques de la turbine MS 5002b..... | 12 |
| I.9.2 Sections principales de la turbine a gaz MS5002b..... | 13 |
| I.9.3.Système de démarrage..... | 21 |
| I.9.4. Système de graissage..... | 22 |
| I.9.5. Système de refroidissement et d'étanchéité..... | 23 |
| I.9.6. Systèmes de protection..... | 23 |

CHAPITRE II : Généralité sur la FMD

| | |
|--|----|
| II.1. Introduction..... | 26 |
| II.2. Définition de la maintenance..... | 26 |
| II.3. Le rôle de la maintenance..... | 26 |
| II.4. Objectifs de la maintenance..... | 28 |
| II.5. Les niveaux de maintenance..... | 28 |
| II.6. Types de maintenance..... | 28 |
| II.6.1. Maintenance corrective..... | 28 |
| II.6.2. Maintenance préventive..... | 29 |
| II.6.3. Maintenance prédictive..... | 30 |
| II.6.4. Diagramme des types de la maintenance..... | 30 |
| II.7. Les opérations de maintenance..... | 30 |
| II.7.1. Le dépannage..... | 30 |
| II.7.2. La réparation..... | 30 |
| II.7.3. Les inspections..... | 31 |
| II.7.4. Les visite..... | 31 |
| II.7.5. Les contrôle..... | 31 |
| II.7.6. Les révisions..... | 31 |
| II.8. Loi de Pareto et la courbe ABC..... | 31 |
| II.8.1. Diagramme de Pareto..... | 31 |
| II.8.2. Définition de la méthode ABC..... | 32 |
| II.8.3. But de la méthode ABC..... | 32 |
| II.9. Etude de FMD..... | 32 |
| II.9. 1. La fiabilité..... | 32 |
| II.9.2. La maintenabilité..... | 40 |
| II.9.3. La disponibilité..... | 42 |
| II.9.4.La relation entre MUT, MTBF, et MTTR..... | 43 |
| II.9.5. La relation entre les notions FMD..... | 43 |
| II.10. Conclusion..... | 44 |

CHAPITRE III : Généralité sur la FMD

| | |
|---|----|
| III.1.Introduction..... | 45 |
| III.2.Exploitation de l'historique..... | 45 |

| | |
|--|----|
| III.3. L'application Pratique des méthodes d'analyse..... | 46 |
| III.3.1. Méthodes d'analyse prévisionnelle ABC (Pareto)..... | 46 |
| III.3.2. La courbe d'analyse ABC..... | 46 |
| III.3.3. Interprétation des résultats..... | 46 |
| III.4. Calcul les paramètres de weibull..... | 47 |
| III.4.1. Test (KOLMOGOROV SMIRNOV) | 48 |
| III.4.2. Exploitation les paramètres de WEIBULL..... | 48 |
| III.5. Étude de modèle de weibull..... | 49 |
| III.5.1. La fonction de la densité de probabilité..... | 49 |
| III.5.2. Fonction de répartition F(t) | 50 |
| III.5.3. La fiabilité..... | 51 |
| III.5.4. Le taux de défaillance..... | 52 |
| III.6. Calcul la Maintenabilité de la turbine..... | 53 |
| III.7. Calcul la disponibilité de la turbine..... | 54 |
| III.7.1. Disponibilité intrinsèque au asymptotique..... | 54 |
| III.7.2. Disponibilité instantané..... | 54 |
| III.8. Conclusion..... | 56 |

| | |
|---------------------------------|-----------|
| CONCLUSION GENERALE..... | 57 |
|---------------------------------|-----------|

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

RESUME

Les tableaux:

| | |
|--|----|
| Tableau III.1 : Dossier historique de la turbine MS5002B | 45 |
| Tableau III.2 : L'analyse ABC (Pareto) | 46 |
| Tableau III.3 : Fonction de réparation réelle | 47 |
| Tableau III.4 : test de Kolmogorov-Smirnov | 48 |
| Tableau III.5 : Calcul la fonction de la densité de probabilité | 49 |
| Tableau III.6 : Fonction de répartition F(t) | 50 |
| Tableau III.7 : Calcul de la fiabilité | 51 |
| Tableau III.8 : Calcul le taux de défaillance | 52 |
| Tableau III.9 : La maintenabilité de la turbine | 53 |
| Tableau III.10 : Tableau de disponibilité instantané | 54 |

Liste des figures

Les figures:

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : les variations de pression et de température dans les Différentes sections de la machine | 3 |
| Figure I.2 : Vue en section d'une turbine à gaz..... | 4 |
| Figure I.3 : schéma de turbine mono-arbre..... | 6 |
| Figure I.4 : schéma de turbine à gaz bi-arbre..... | 7 |
| Figure I.5 :deux types de turbines aérodérivatives..... | 9 |
| Figure I.6 :deux exemples de turbines à gaz industrielles..... | 10 |
| Figure I.7 : Schéma de la section d'admission | 14 |
| Figure I.8 : Schéma de rotor et stator du Compresseur axial..... | 15 |
| Figure I.9 : Schéma de section de combustion..... | 16 |
| Figure I.10 : schéma de chambre de combustion..... | 17 |
| Figure I.11 : schéma de bougie d'allumage..... | 18 |
| Figure I.12 : schéma de Détecteurs de flamme ultraviolets..... | 18 |
| Figure I.13 : schéma de directrice de premier étage..... | 20 |
| Figure I.14 : schéma de directrice de deuxième étage..... | 20 |
| Figure I.15 :Schéma de rotor HP et rotor BP..... | 21 |
| Figure I.16 : schéma de système de graissage..... | 22 |
| Figure I.17 : Schéma de système de refroidissement et d'étanchéité..... | 23 |
| Figure II.1 : Différents Types De Maintenance..... | 30 |
| Figure II.2 : Courbe en baignoire..... | 35 |
| Figure II.3 : Principales propriétés de la distribution de Weibull..... | 37 |
| Figure II.4 : Représentation sur graphique à échelle fonctionnelle de La distribution de Weibull (graphique d'Allan Plait) | 38 |
| Figure II.5 : redressement de la courbe par translation..... | 39 |
| Figure II.6 : probabilité de réparation au cours de temps..... | 41 |
| Figure II.7 : Vie d'un système : évolution dans le temps..... | 43 |

| | |
|---|----|
| Figure II.8 : La relation entre les notions FMD..... | 43 |
| Figure III.1 : La Courbe d'ABC..... | 46 |
| Figure III.2 : papier de Weibull..... | 47 |
| Figure III.3 : La Courbe Densité De Probabilité..... | 50 |
| Figure III.4 : La Courbe De Fonction Répartition..... | 51 |
| Figure III.5 : La Courbe De la Fonction Fiabilité..... | 52 |
| Figure III.6 : Le courbe taux de défaillance..... | 53 |
| Figure III.7 : La Courbe de Maintenabilité..... | 54 |
| Figure III.8 : La Courbe de disponibilité instantané | 55 |

Introduction :

Actuellement l'Algérie se trouve en face de grands changements dans l'économie nationale. Les développements de différentes industries (lourde, légère, de l'énergie, de la chaîne et pétrochimie etc...) ainsi que l'économie de l'agriculteur exige un système d'appareillage qui permette d'améliorer le travail, accélérer les systèmes de productivités, augmenter le volume des produits finis. Parmi les machines ayant un rôle primordial dans les domaines d'activités industrielles, on peut citer les turbines à gaz.

Les turbines à gaz ont connus au cours dernières années un développement considérable dans des nombreuses applications industrielles. En particulier dans le domaine du transport et de réinjection du gaz.

Chaque entreprise doit être en état de choisir des turbines à gaz selon les exigences technologie, le choix des turbines à gaz dépend de la construction de ces machines, leur principe de fonctionnement, les paramètres principaux, les règles de l'entretien et les bases théorique pour prévoir l'état de la machine dans les différentes conditions d'emploi.

Parmi les turbines utilisées dans les centres industriels, les turbines MS5002b qui possèdent deux arbres indépendants mécaniquement, fabriqué par NUOVO PIGNONE.

Notre objectif dans ce mémoire est de faire une analyse FMD sur la turbine a gaz MS5002b. Le travail est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre : généralité sur les turbines a gaz.

Le deuxième chapitre : généralité sur la fiabilité, maintenabilité et la disponibilité.

Le troisième chapitre : Analyse FMD de la turbine à gaz MS5002b.

I.1. Historique de la turbine à gaz :

Dans l'histoire de la turbine à gaz, on peut distinguer trois périodes :

En 1791, l'Anglais John Barber brevetait un appareil hybride puisque cette turbine à gaz comportait un compresseur alternatif. Pour les turboréacteurs, c'est le Français Lorin qui, en 1911, en fait breveter le principe.

Entre 1901 et 1906, les recherches des Français Armengaud et Le Male aboutissent au premier turbomoteur autonome avec un rendement global à 3%.

En 1930 : Brevets par Frank Whittle de moteurs à réaction d'aviation qui sont des turbines à gaz.

Les années 1950 : utilisation des turbines pour la production d'électricité avec un rendement de 30%.

Les années 60 : diminution du coût du gaz et l'utilisation des turbines à gaz se multiplie dans le domaine industriel notamment dans l'industrie pétrolier et de gaz. **[1]**

Dans ce domaine, trois générations peuvent être classées, distinguées par les intervalles de température maximale (en °C) des gaz à l'entrée du premier étage du rotor de la turbine :

- 1e génération : $760 < T_{\max} < 955$ °C
- 2e génération : $955 < T_{\max} < 1124$ °C
- 3e génération : $1149 < T_{\max} < 1288$ °C

I.2. Définition :

La turbine à gaz est un moteur à combustion interne de tous les points de vue. Elle peut être considérée comme un système autosuffisant. En effet, elle prend et comprime l'air atmosphérique dans son propre compresseur, augmente la puissance énergétique de l'air dans sa chambre de combustion et convertit cette puissance en énergie mécanique utile pendant les processus de détente qui a lieu dans la section turbine.

L'énergie mécanique qui en résulte est transmise par l'intermédiaire d'un accouplement à une machine réceptrice, qui produit la puissance utile pour le processus industriel.

L'énergie mécanique qui en résulte est transmise par l'intermédiaire d'un accouplement en puissance utile à une machine réceptrice « alternateurs, pompes centrifuges, compresseurs de gaz...Etc.).

I.3.Principe de fonctionnement :

Une turbine à gaz fonctionne de la façon suivante :

- elle extrait de l'air du milieu environnant ;
- elle le comprime à une pression plus élevée ;
- elle augmente le niveau d'énergie de l'air comprimé en ajoutant et en brûlant le combustible dans une chambre de combustion ;
- elle achemine l'air à pression et à température élevées vers la section de la turbine, qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique pour faire tourner l'arbre ; ceci sert, d'un côté, à fournir l'énergie utile à la machine conduite, couplée avec la machine au moyen d'un accouplement et, de l'autre côté à fournir l'énergie nécessaire pour la compression de l'air, qui a lieu dans un compresseur relié directement à la section turbine ;
- elle décharge à l'atmosphère les gaz à basse pression et température résultant de la transformation mentionnée ci-dessus. [3]

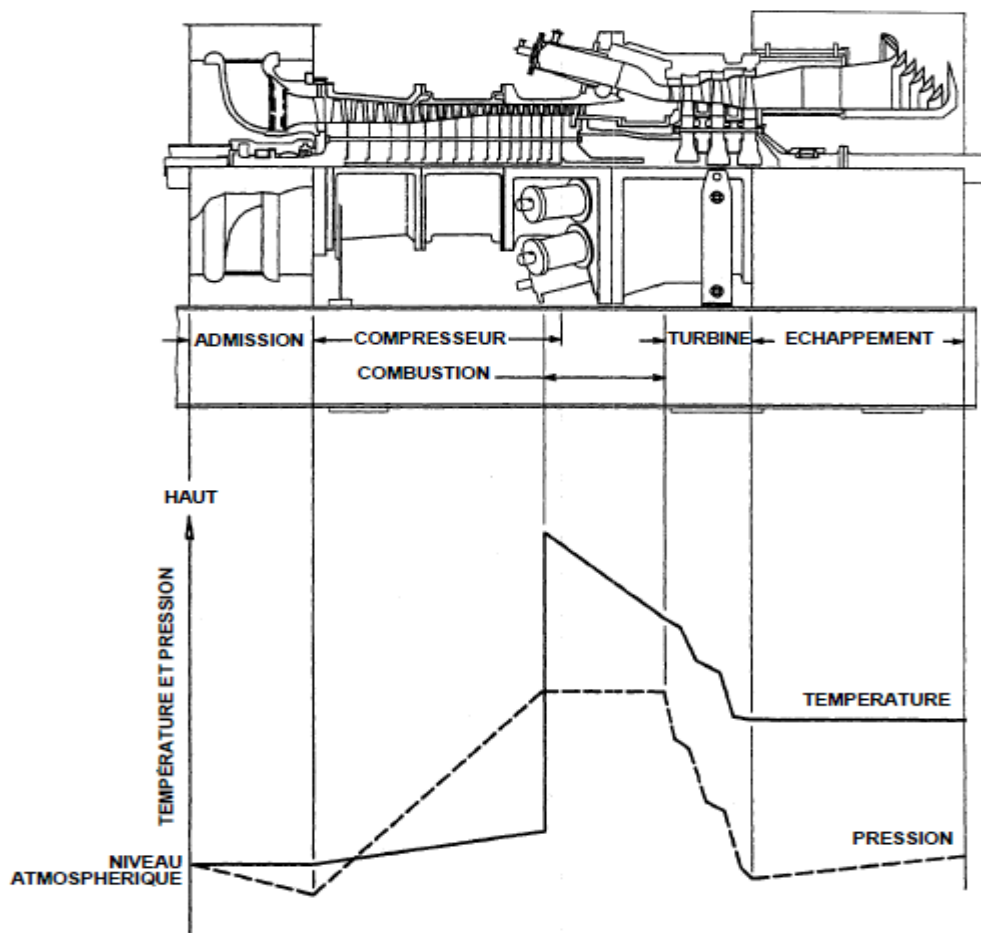


Figure I.1 : les variations de pression et de température dans les différentes sections de la machine.

I.4. Les éléments principaux d'une turbine a gaz :

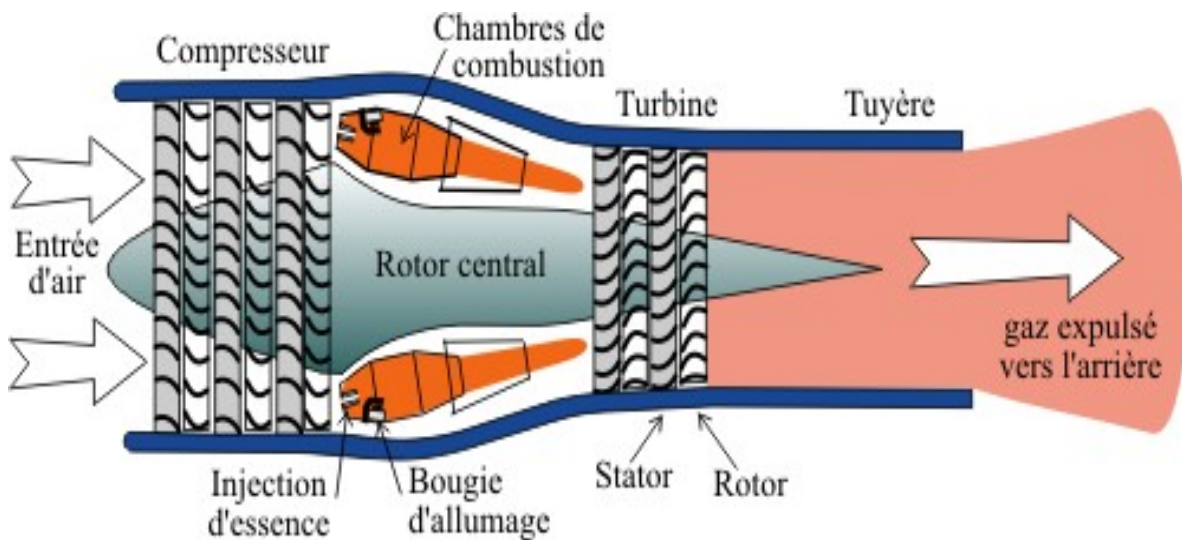


Figure I.2 : Vue en section d'une turbine à gaz

I.4.1. Compresseur :

Le compresseur est du type à flux axial. Le système à flux axial produit des débits d'air élevés, nécessaires pour obtenir des valeurs élevées de puissance utile avec des dimensions réduites. Ce concept sera repris plus tard, quand les principes thermodynamiques principaux du cycle de fonctionnement d'une turbine à gaz seront illustrés.

Un compresseur se compose d'une série d'étages d'aubes orientables, qui augmentent la vitesse de l'air en termes d'énergie cinétique, suivie alternativement par des étages d'aubes fixes, qui convertissent l'énergie cinétique en une pression plus élevée.

Le nombre d'étages de compression est lié à la structure de la turbine à gaz et, surtout, au taux de compression à obtenir.

Sur le côté d'admission du compresseur, il y a des aubes variables à l'admission (IGV), dont le but primaire est de diriger l'air, fourni par le système d'aspiration, vers le premier étage des aubes du rotor.

Une autre fonction importante des IGV est d'assurer le comportement fluide-dynamique correct du compresseur sous différents régimes transitoires de fonctionnement (par exemple, pendant le démarrage et l'arrêt) quand, en raison de différentes vitesses de fonctionnement par rapport à la vitesse de fonctionnement normale, l'angle d'ouverture des IGV est modifié : ceci sert à changer le taux de refoulement de l'air et à reconstituer les triangles idéaux de vitesse durant les régimes transitoires.

En conclusion, dans les cycles combinés et dans les installations de cogénération, la possibilité de changer la position géométrique des IGV permet d'optimiser les températures d'échappement de la turbine et, ainsi, d'augmenter le rendement du cycle de récupération en changeant le débit d'air qui entre dans le compresseur.

Sur le côté du refoulement du compresseur il y a quelques étages d'aubes variables à la sortie ou EGV, nécessaires pour obtenir la récupération de la pression maximale avant que l'air entre dans la chambre de combustion.

Le compresseur sert également à fournir une source d'air nécessaire pour refroidir les parois des directrices, des aubes et des disques de la turbine, qui sont atteintes par l'intermédiaire de canaux à l'intérieur de la turbine à gaz, et par la tuyauterie de raccordement extérieur. En plus, le compresseur fournit l'air d'étanchéité aux joints à labyrinthe du palier.

I.4.2. Section de combustion :

La section de combustion se compose d'un système comprenant une ou plusieurs chambres de combustion annulaires disposées symétriquement le long d'une circonférence ; ces chambres de combustion reçoivent et brûlent du combustible au moyen d'un nombre égal des brûleurs (un pour chaque chambre de combustion).

L'air entre dans chaque chambre dans une direction opposée à la veine intérieure des gaz chauds (pour cette raison, cette méthode de distribution de l'air s'appelle à "débit inverse").

Ce courant extérieur d'air, qui s'écoule le long des chemises, sert à les refroidir. En outre, l'air qui n'est pas employé dans le processus de combustion, est employé pour refroidir les gaz chauds après la combustion ; en effet, il est introduit dans les chambres par les trous de mélange et refroidit le gaz à la température optimale d'admission de la turbine.

La veine des gaz chauds du système de combustion à l'admission de la turbine traverse les pièces de transition qui transforment les écoulements du gaz de chacune des chambres de combustion en un courant annulaire continu adapté à l'admission de l'anneau de la directrice du premier étage.

Au début, le processus de combustion est déclenché par une ou plusieurs bougies d'allumage. Une fois déclenchée, la combustion continue sans interventions, aussi longtemps que les conditions d'alimentation de combustible et d'air de combustion sont maintenues.

I.4.3. Section de la turbine :

la section de la turbine comprend un certain nombre d'étages chacun d'entre eux se compose d'un étage stator et d'un étage rotor (aubes) ; dans l'étage stator, les gaz à températures et pression élevées, fournis par la pièce de transition, sont accélérés et acheminés vers un étage d'aubes du rotor montées sur un disque connecté à l'arbre de puissance.

La conversion de l'énergie thermique et de la pression, en énergie cinétique a lieu dans l'étage du stator.

L'étage du rotor complète cette conversion, étant donné qu'ici l'énergie cinétique est transformée en énergie d'entraînement de l'arbre, développant, de cette manière, la puissance requise pour entraîner le compresseur (l'énergie de compression intérieure, ne peut être employée en tant qu'énergie utile extérieure) et pour mettre en marche la machine conduite (générateur, compresseur, etc.) reliée à la turbine à gaz au moyen d'un accouplement.

L'énergie des gaz fournis par le système de combustion peut être modifiée en changeant le taux d'alimentation du combustible. De cette façon, on peut régler les valeurs de puissance utile nécessaires pour le processus technologique où la turbine à gaz sert de moteur d'entraînement. [3]

I.5. Classification des turbines a gaz :

I.5.1. D'après le mode de construction :

I.5.1.1. Turbine mono-arbre :

Le compresseur et les sections de la turbine sont montés sur un même arbre ce qui permet de tourner à la même vitesse, ce type est utilisé pour les applications qui n'ont pas besoin des variations de vitesse telle que l'entraînement des génératrices pour production de l'électricité.

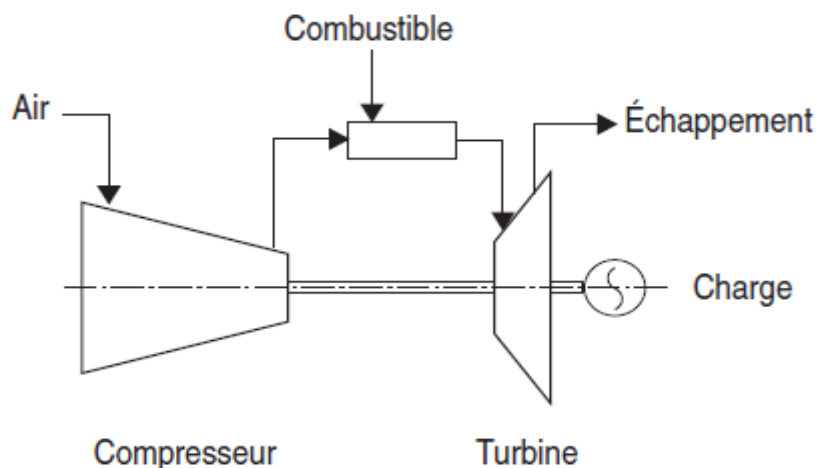


Figure I.3 : schéma de turbine mono-arbre

I.5.1.2. Turbine bi-arbre:

La turbine à gaz se compose de deux roues turbines indépendantes mécaniquement.

La roue turbine HP entraîne le rotor du compresseur axial et les accessoires, tandis que la roue BP deuxième étage sert à entraîner l'organe récepteur (ex : les compresseurs).

Le but des roues turbines non reliés est de permettre aux deux r des vitesses différentes pour satisfaire aux exigences de charge variable de récepteur. [4]

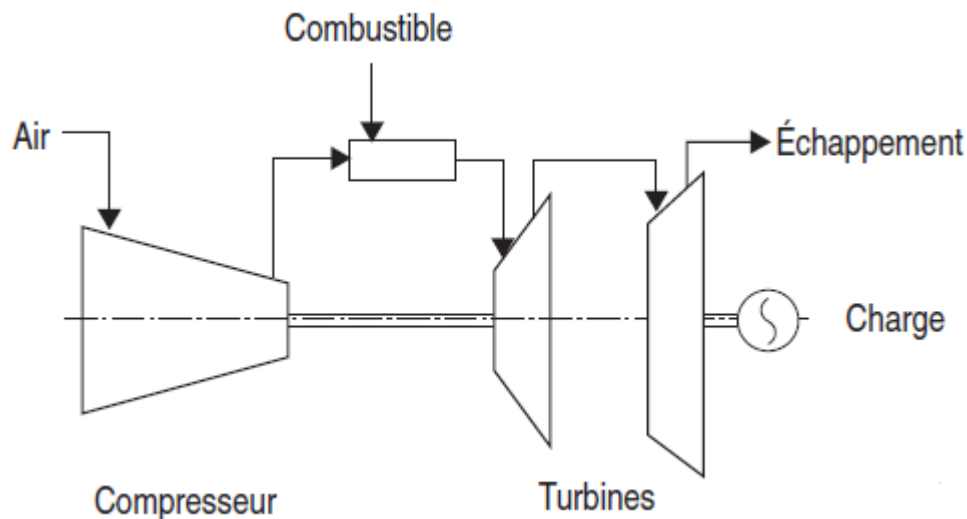


Figure I.4 : schéma de turbine à gaz bi-arbre

I.5.2. D'après le mode de fonctionnement thermodynamique :

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

I.5.2.1. Turbine à cycle simple :

c'est une turbine utilisant un seul fluide pour la production d'énergie mécanique après la détente les gaz possédant encore un potentiel énergétique sont perdus dans l'atmosphère à travers la cheminée.

I.5.2.2. Turbine à cycle avec régénération :

Les pertes de chaleur causées par les gaz d'échappement sont les plus importantes dans l'installation de turbine à gaz. Pour cela le rendement des installations de turbine à gaz peut être augmenté, en conduisant les gaz d'échappement dans un échangeur thermique où ils réchauffent l'air sortant du compresseur avant son entrée dans les chambres de combustion on récupère une partie de chaleur sensible de ces gaz qui se trouvait perdue dans l'atmosphère.

I.6. Différents types de turbines :

I.6.1. Turbines à gaz dérivées de l'aviation :

Ces turbines à gaz ont été étudiées et construites pour la motorisation des appareils aéronautiques tels que les avions et les hélicoptères. Elles sont souvent dénommées **aérodérivatives**, nom anglo-saxon passé dans les usages des spécialistes.

La conception de ces turbines est dominée par le souci de réduire le poids et les dimensions des composants du moteur et de ses auxiliaires, les performances requises étant alors atteintes grâce aux grandes vitesses de rotation. Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, le développement considérable du transport aérien a conduit à l'augmentation de la puissance unitaire des turbines à gaz d'aviation.

Ce but a été atteint au prix de vastes programmes de recherche visant essentiellement à l'élévation de la température des gaz de combustion.

D'année en année, ce paramètre a pu être amélioré grâce à l'élaboration d'alliages résistant aux températures élevées, ainsi qu'à la mise au point de procédés permettant la fabrication des ailettages de turbine creux afin de les ventiler intérieurement pour les refroidir.

Certains constructeurs de turbines à gaz destinées à l'aviation ont créé des versions adaptées à des applications industrielles. Les performances de ces turbines sont généralement très sensiblement inférieures à celles des modèles destinés à l'aéronautique.

En effet, les températures élevées des parties chaudes dans les turbines aéronautiques conduisent à des programmes d'entretien et de remise en état incompatibles avec les temps de service exigés dans l'industrie pour des installations destinées à un service continu.

Toutefois, les turbines à gaz *aérodérivatives* peuvent rivaliser en performances et robustesse avec les turbines à gaz industrielles ; cela dépend souvent de la qualité de leur installation et de leur adaptation à leur fonction industrielle. **[4]**

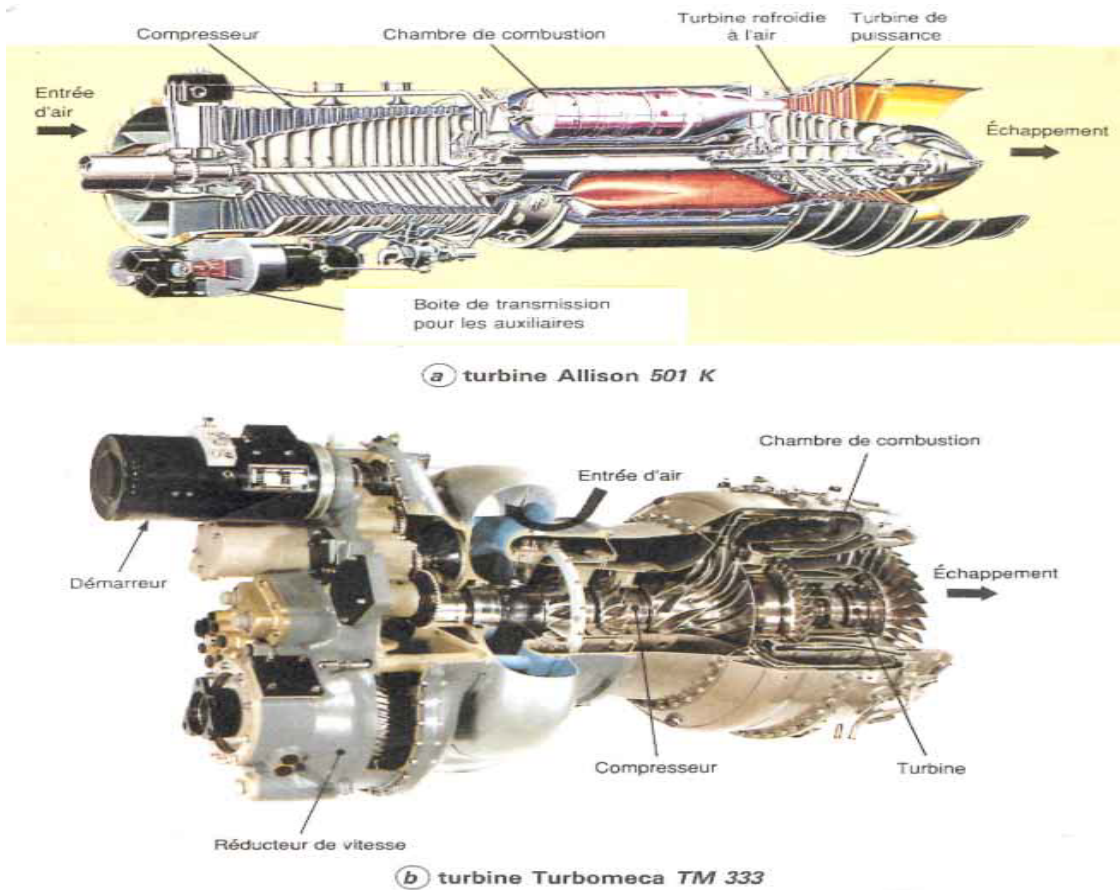


Figure I.5 : deux types de turbines aérodérivatives.

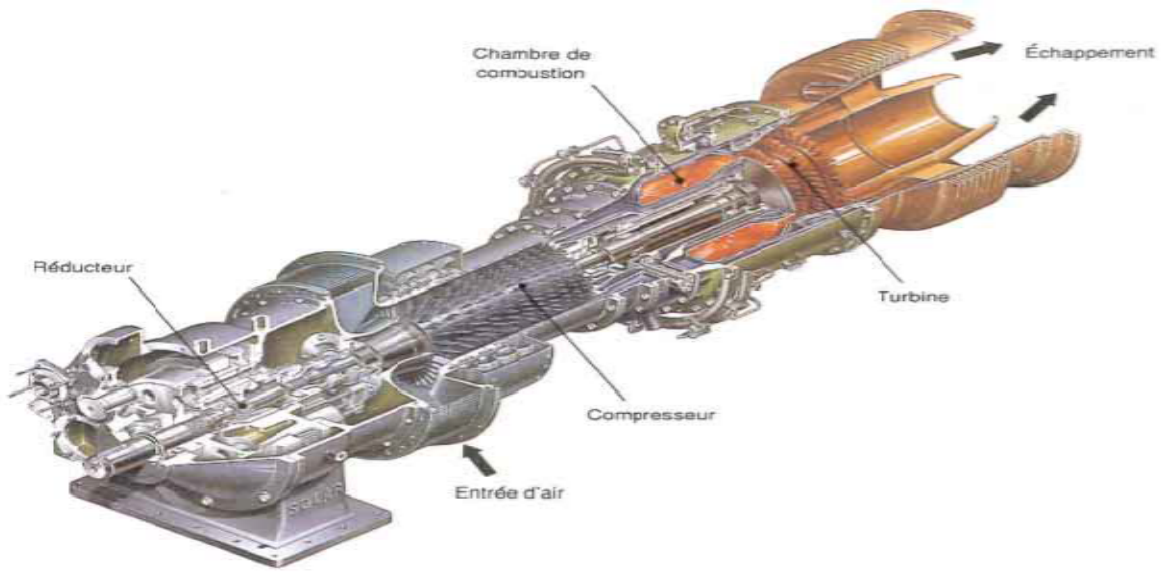
I.6.2. Turbines à gaz industrielles :

Les turbines exclusivement industrielles sont des turbines à gaz étudiées et réalisées pour répondre, avec leurs auxiliaires directement entraînés, aux conditions de fiabilité et de durabilité normalement retenues dans l'industrie.

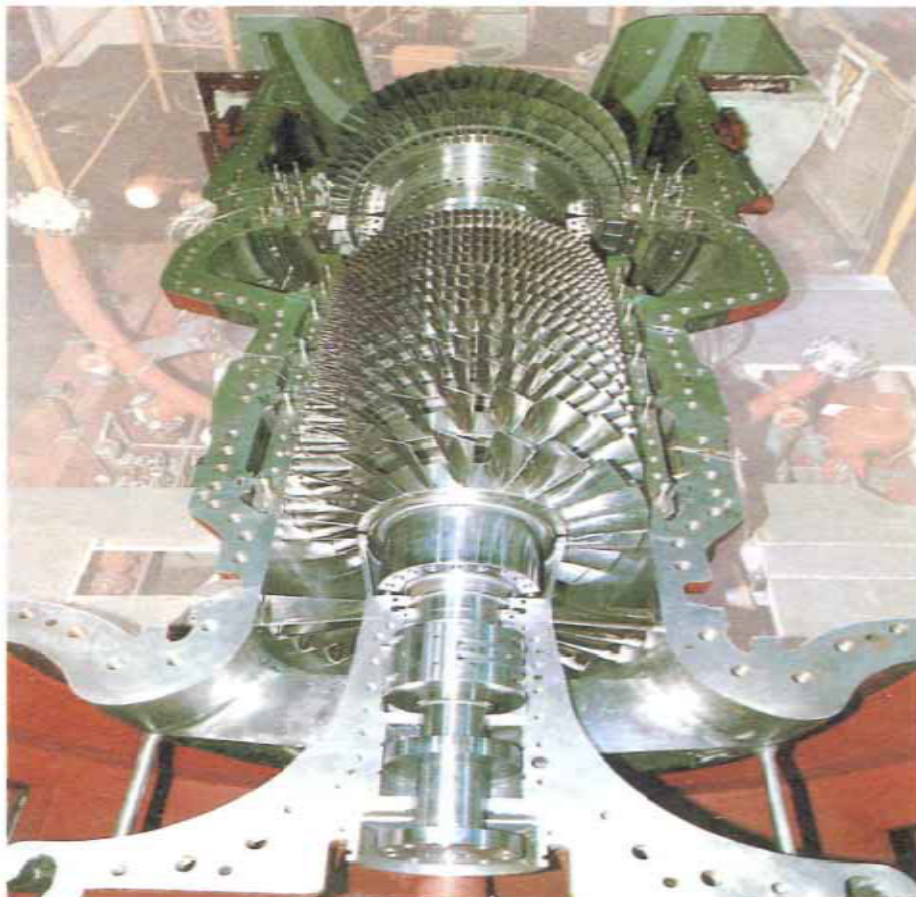
Les premières turbines industrielles furent conçues dans le même esprit que les turbines à vapeur et, de ce fait, l'ensemble de la construction était lourd et encombrant. Bien que certains constructeurs aient conservé cette technologie, la majorité d'entre eux a opté, en s'appuyant sur l'expérience des turbines d'aviation, pour des solutions plus légères et moins encombrantes tout en sauvegardant les qualités industrielles.

Comme pour les turbines d'aviation, les puissances ont augmenté grâce à l'application aux parties chaudes des progrès effectués dans la métallurgie et dans la fabrication des ailetages.

L'emploi dans les turbines à gaz de matériaux nouveaux ou dont la transformation industrielle est maintenant maîtrisée permettra dans les années à venir d'obtenir des rendements et des puissances encore plus élevés. [4]



a turbine Solar Centaur



b turbine Mitsubishi MF-111

Figure I.6 : deux exemples de turbines à gaz industrielles.

I.7.Principales utilisations :

Chaque cas d'application d'une turbine à gaz comprend un nombre important de paramètres de définition spécifiques : type de combustible, durée de fonctionnement par an, températures extérieures extrêmes, montage, nuisances, etc.

Il en résulte qu'une installation de turbine à gaz doit être personnalisée afin de répondre aux conditions d'exploitation envisagées.

Les critères servant de base de réflexion pour choisir le dimensionnement d'une installation.

I.7.1. Production d'électricité :

Cette application est extrêmement courante : l'arbre de la turbine entraîne un réducteur dont l'arbre petit vitesse entraîne un alternateur.

Le système mécanique est simple et peut être comparé à un groupe turboalternateur à vapeur.

Produire uniquement de l'électricité avec une turbine à gaz n'est intéressant que pour des conditions d'exploitation imposant ce système.

I.7.2. Production combinée chaleur-force :

Ce type d'application est le plus courant car il permet :

- sur le plan national, d'économiser l'énergie fossile, gazeuse ou liquide, que nous importons presque en totalité ;
- sur le plan industriel, d'économiser sur les dépenses énergies.

I.7.3. Pompage et compression :

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

Le choix entre une turbine à un ou à deux arbres dépend du type de machine accouplé à la turbine et du mode d'exploitation envisagé.

Un cycle combiné chaleur-force est encore réalisable et procure une diminution de la facture d'énergie électrique. [4]

I.8.Avantages et inconvénients des turbines à gaz :**I.8.1. Avantages :**

Une puissance élevée dans un espace restreint dans le quel un groupe diesel de même puissance ne pourrait pas être logé.

- A l'exception de démarrage et arrêt, la puissance est produite d'une façon continue.
- Démarrage facile même à grand froid.
- Diversité de combustible pour le fonctionnement.

- Possibilité de fonctionnement à faible charge.

I.8.2. Inconvénients :

- Au-dessous d'environ 3000KW, prix d'installation 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). À titre indicatif : 28 à 33 % pour une turbine de 3000 KW, 32 à 38 % pour un groupe diesel

I.9. Turbine a gaz type MS5002b :

I.9.1. Caractéristiques de la turbine MS 5002b :

- Marque GENERALE ELECTRIQUE
- Fabricant NUOVO PIGNONE
- Série du model MS 5002b
- Cycle Simple
- Rotation de l'arbre sens inverse des aiguilles d'une montre
- Type de fonctionnement Continu
- Vitesse de l'arbre HP 5100 tr/min
- Vitesse de l'arbre BP 4670 tr/min
- Commande MARK II
- Débit carburant 2 Kg/s
- Système de démarrage Turbine à détente
- Rendement thermique \approx 28%
- Atténuation du bruit silencieux d'admission et d'échappement selon les --
exigences locales ;

I.9.1.1. Section du compresseur :

- Nombre des étages du compresseur axial 16;
- Type du compresseur écoulement axial, série lourde ;
- Plan de joint bride horizontale ;
- Type d'aubes directrice d'entrée variable ;
- Pression à l'admission 1,013 bar ;
- Pression de refoulement 6 bars ;

I.9.1.2. Section de la turbine :

- Nombre des étages de la turbine.....02 ;
- Plan de joint.....bride horizontale ;
- Directrice du premier étage.....fixe ;
- Directrice du deuxième étage.....variable

I.9.1.3. Section de combustion :

- Type.....12 multiples foyers, types à flux inverses ;
- Configuration des chambres.....concentrique autour du compresseur ;
- Combustible Gaz naturel ;
- Bougies d'allumage.....deux, types à électrodes à ressort, auto rétractant;
- Détecteur de flamme.....deux, type ultraviolet ;

I.9.1.4. Ensemble paliers :

- Quantité.....04 ;
- Lubrification.....sous pression;

I.9.1.5. Pompes d'huile de graissage:

- Pompe de graissage principale.....Entraînée par arbre intégral avec le réducteur auxiliaire;
- Pompe de graissage auxiliaire.....Entraînée par moteur, verticale, centrifuge, immergée ;
- Pompe de graissage de secours.....Entraînée par moteur, verticale, centrifuge, immergée ;

I.9.2 Sections principales de la turbine a gaz MS5002b :**I.9.2.1. Section d'admission :**

La section d'admission d'une turbine à gaz a pour but de diriger l'air ambiant dans l'admission du compresseur axial afin de garantir:

1- Une bonne filtration de l'air pour le bon fonctionnement de la turbine.

· Les particules solides contenues dans l'air admis (surtout pour les atmosphères humide) peuvent se collées sur les bouts d'ailettes de compresseur, ainsi que sur la base des aubes de stator par effet des forces centrifuges, donc une perte de rendement du compresseur et une augmentation de la consommation spécifique de la turbine.

- Des grains de sable non bloqués par le filtre pour le cas des turbines implantées dans le sahara, causent une usure érosive surtout aux hautes vitesses de rotation, cela peut changer le profil aérodynamique des ailettes, et peut même aller jusqu'à l'arrachement des ailettes du compresseur.
- La présence des agents corrosifs par exemple: (Chlorure de Sodium près de la mer et dans les régions salées), peut induire une dégradation corrosive des équipements de la machine.

2- Un débit d'air admis régulier afin de produire la puissance voulue. Le bouchage du filtre limite le débit d'air admis, qui a pour conséquences une chute de puissance, et une augmentation de la consommation spécifique.

La section d'admission comprend les éléments principaux suivants: filtre d'admission, conduite, silencieux, coude, caisson d'admission et accessoires. L'air entre dans le filtre, traverse la conduite, le silencieux, le coude et le caisson d'admission et enfin le compresseur.

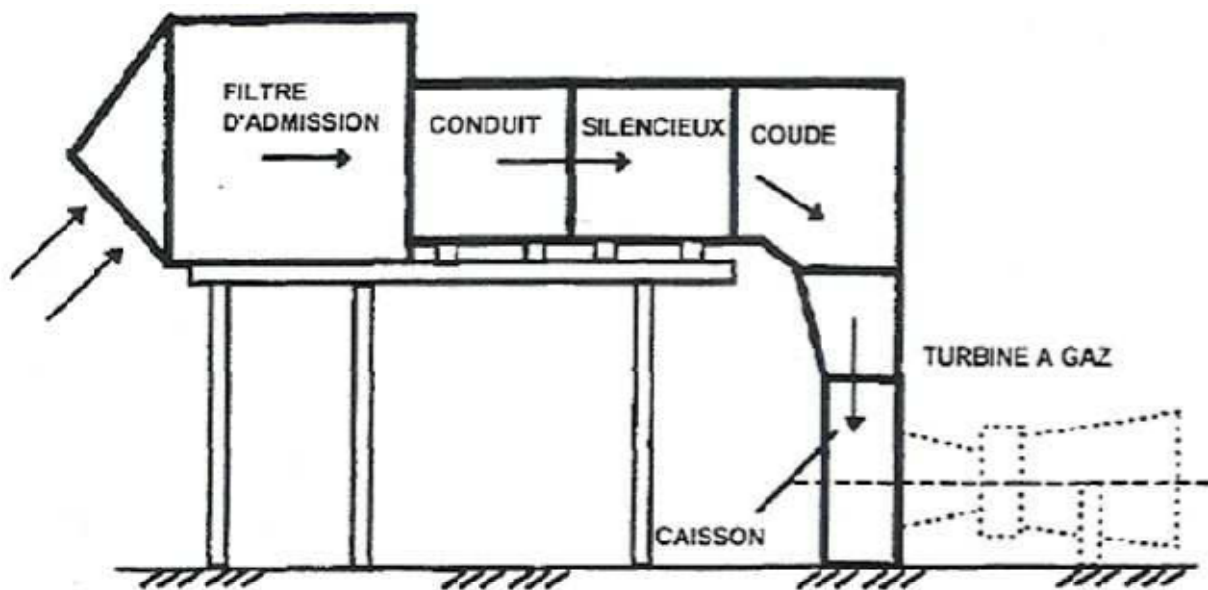


Figure I.7: Schéma de la section d'admission

I.9.2.2 Section compresseur :

La section du compresseur axial comprend le rotor et le corps du compresseur de seize (16) étages de compression, les aubes variables de la directrice et de deux déflecteurs de sortie.

L'air est comprimé à travers d'une série d'aubes du rotor et les aubes du stator guident l'air et l'orientent dans l'étage suivant du rotor.

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

- Assurer l'alimentation des chambres de combustion avec l'air comprimé, pour l'opération de combustion;
- Assurer un débit et une pression de valeurs convenables pour avoir une puissance utile suffisante;
- Assurer le débit d'air nécessaire pour le refroidissement des pièces exposées aux fortes contraintes thermiques



Figure I.8: Schéma de rotor et stator du Compresseur axial

La partie stator (corps du compresseur) est composée de quatre éléments principaux qui sont:

- Corps coté aspiration: Le corps d'admission se trouve à l'avant de la turbine à gaz, sa fonction est de diriger l'air de façon uniforme vers le compresseur, il porte le premier palier du stator.
- Corps partie avant: contient les quatre premiers étages du stator, il transmet également les charges de structure qui viennent du corps adjacent vers le support avant.
- Corps partie arrière : Contient les derniers étages du stator, les orifices d'extraction prévus dans ce corps permettent de prélever l'air au niveau du dixième étage du compresseur ; Cet air est employé pour refroidir, assurer les fonctions d'étanchéité et contrôler les pulsations au démarrage et à l'arrêt.
- Corps coté refoulement : C'est l'élément final et la pièce coulée la plus longue, situé à mi-chemin entre les supports avant et arrière. Ce corps porte le deuxième palier de la turbine. Sa fonction est de contenir les sept derniers étages de compression et forme avec la paroi intérieure et extérieure le diffuseur du compresseur.

I.9.2.3 Section de combustion : [5]

La section de chambre de combustion de la turbine à gaz MS5002B comporte l'enveloppe de combustion qui est composée de douze corps de combustion extérieure, douze ensembles chapeau et chemises de combustion, douze ensembles de pièces de transition et douze injecteurs de combustible, deux bougies d'allumage, deux détecteurs de flamme, douze tubes à foyer et divers garnitures.

L'enveloppe de combustion soutient les douze corps de combustion et renferme les douze pièces de transition. C'est un élément soudé entourant la partie arrière du corps de refoulement du compresseur et recevant l'air de refoulement du compresseur à flux axial. Le combustible est envoyé dans chaque chemise des chambres de combustion par un injecteur de combustible monté dans le couvercle de cette dernière et pénétrant dans la chemise. Lorsque l'allumage se produit dans les tubes foyer, ils vont allumer le mélange air combustible des autres chambres.

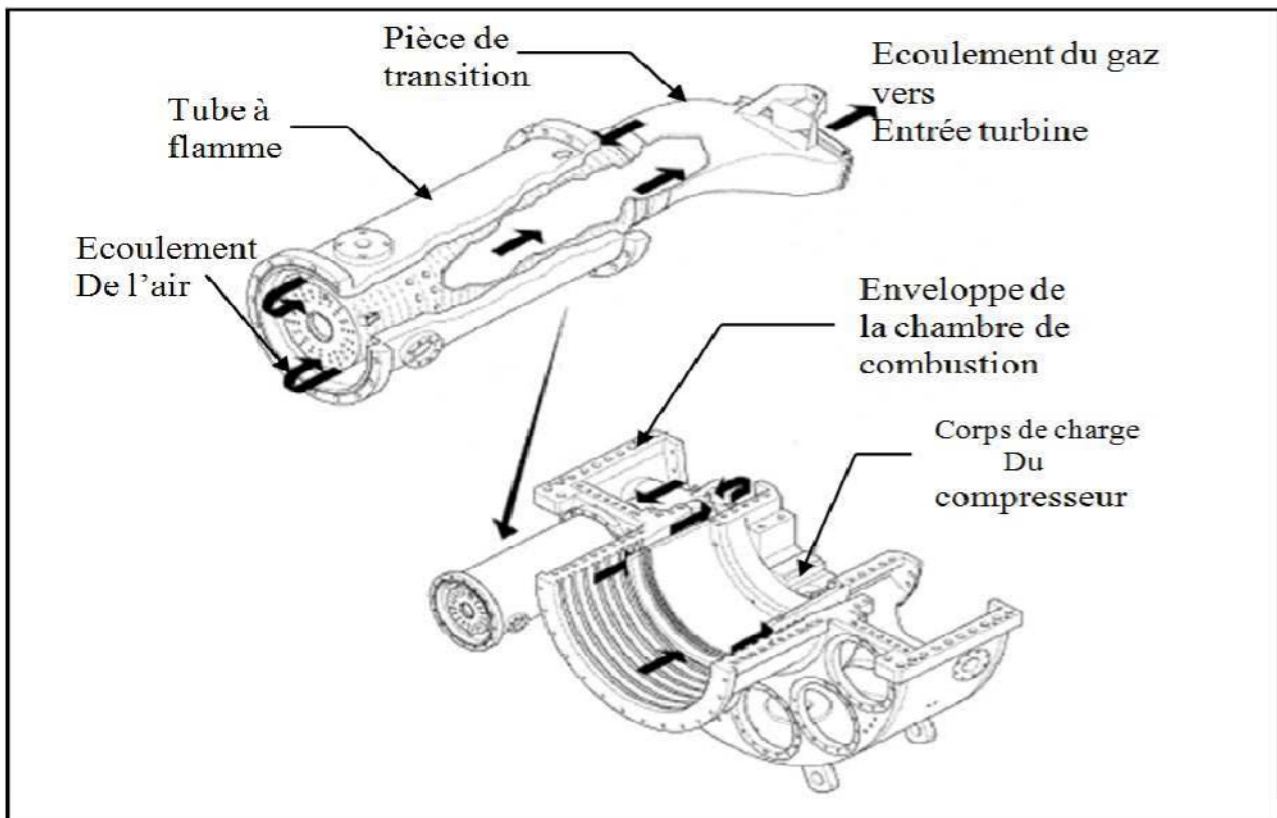


Figure I.9: Schéma de section de combustion

I.9.2.3.1. Corps de combustion:

Les brides arrière des douze corps de combustion sont montées sur la surface verticale avant de l'enveloppe de combustion. Les ensembles chapeau-chemise se trouvent à l'extérieur de chaque corps. Les injecteurs de combustibles montés dans les couvercles du corps de combustion pénètrent dans les chambres et assurent l'alimentation en combustible

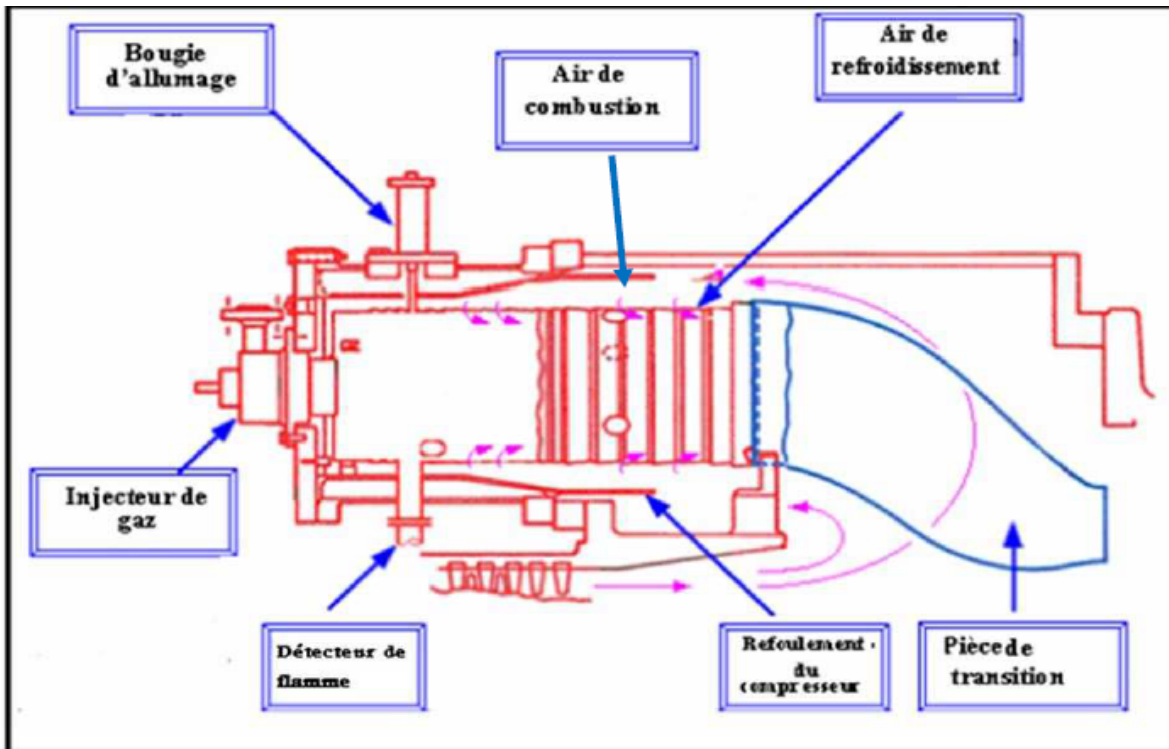


Figure I.10: schéma de chambre de combustion

I.9.2.3.2 Bougie d'allumage:

La combustion du mélange de combustible et d'air est déclenchée par les bougies avec électrodes rétractiles. Deux bougies sont installées dans chacune des deux chambres de combustion, (N°9 et N°10) et reçoivent l'énergie des transformateurs d'allumage. Les autres chambres sans bougies, sont allumées à travers les tubes-foyers d'interconnexion.

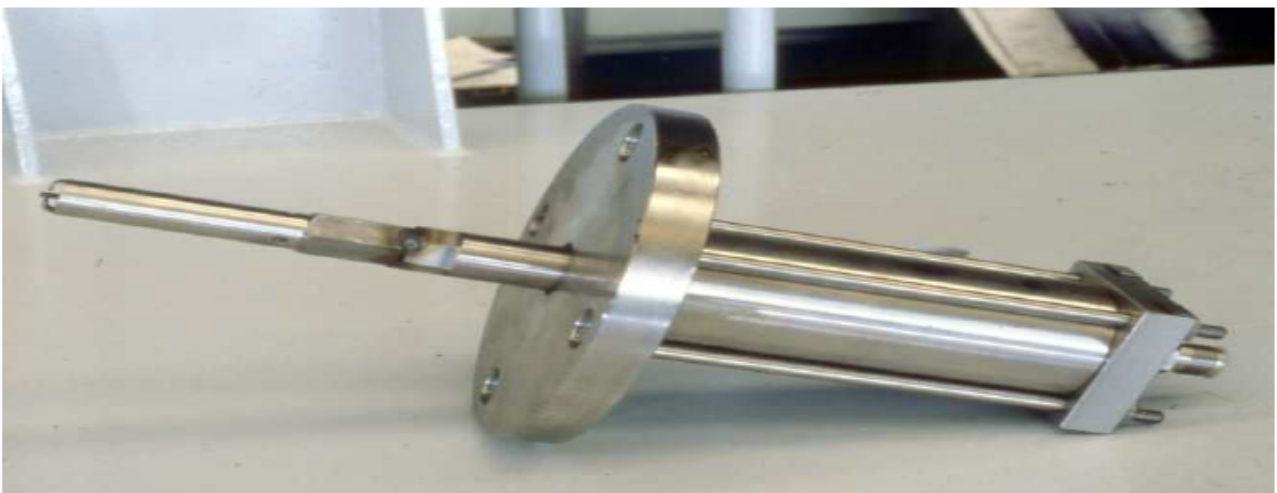


Figure I.11: schéma de bougie d'allumage

I.9.2.3.3. Détecteurs de flamme ultraviolets :

Pendant la séquence de lancement, on envoie une indication de présence ou d'absence de flamme au système de commande, géré par le système de contrôle de flamme.

Le capteur de flamme est sensible à la présence des radiations ultraviolettes émises par la flamme aux hydrocarbures.



Figure I.12: schéma de Détecteurs de flamme ultraviolets

I.9.2.3.4. Injecteur de combustible :

Chacune des chambres de combustion est équipée d'un injecteur de combustible qui pulvérise sous forte pression une quantité donnée de combustible dans la chambre de combustion.

Le combustible gazeux est admis directement dans chaque chambre par les trous de dosage positionnés au rebord extérieur du bout des injecteurs de combustible.

Le rôle de la chambre de combustion:

Le rôle de la chambre de combustion est de fournir la quantité de chaleur nécessaire pour le cycle de la turbine à gaz. La forme des chambres de combustion est conçue pour remplir les conditions suivantes:

- _ La durée de vie la plus longue possible.
- _ Avoir un encombrement minimal.
- _ Garantir un bon allumage et une stabilité de la flamme.
- _ Assurer une combustion la plus complète possible.
- _ Eviter le dépôt de carbone sur les brûleurs et les parois, ainsi que des fumées.
- _ Réduire les pertes de charges.

I.9.2.4. Section turbine : [5]

Cette section comprend les éléments suivants: le corps de la turbine, la directrice de premier étage, la roue de la turbine premier étage (turbine HP), la directrice à aubes variables de deuxième étage et la roue de la turbine de deuxième étage (turbine BP).

Cette section comprend aussi le diaphragme (séparer les deux étages de la turbine et former le couloir de passage d'air) l'étanchéité d'air et la veine des gaz entre les divers étages. Pour permettre le montage du rotor et faciliter l'entretien, le corps du stator est fondue en deux Parties à surface de contact horizontale.

I.9.2.4.1. Directrice de premier étage :

Elles sont supportées dans la veine de gaz par un dispositif de fixation prévu dans le corps de la turbine. L'air refoulé par le compresseur à partir des enveloppes de combustion vient dans l'anneau support de retenu des aubes creuses de la directrice, pour s'échapper par les trous d'extraction dans la veine de gaz vers l'échappement. Ce flux d'air permet le refroidissement des aubes de la directrice.



Figure I.13: schéma de directrice de premier étage

I.9.2.4.2. Directrices deuxième étage:

Elles sont Composées d'aubes orientables, qui forment un angle variable avec la directrice d'écoulement des gaz dans la section annulaire juste avant le deuxième étage de la turbine BP.

On peut donner une rotation grâce à des axes qui dépassent des manchons prévus dans le corps de la turbine. Les leviers clavetés à l'extrémité de ces axes et sont reliés par des biellettes à des points de la couronne de contrôle qui sont actionnés par un piston hydraulique.



Figure I.14: schéma de directrice de deuxième étage

I.9.2.4.3. Rotor de la turbine :

La turbine à gaz dispose de deux rotors séparés : celui du 1er étage ou de la turbine haute pression, et le rotor de la turbine de 2ème étage, ou de la turbine basse pression.

Les deux rotors de la turbine sont alignés dans la section turbine et sont mécaniquement indépendants l'un de l'autre, ce qui permet aux deux turbines de tourner à des vitesses différentes.

La roue de la turbine du premier étage est boulonnée directement sur le demi-arbre arrière du rotor du compresseur.

La roue de deuxième étage est boulonnée sur l'arbre de la roue pour former le rotor de turbine basse pression (de puissance). Ce rotor est soutenu par deux paliers : le coussinet lisse N°3 situé à l'avant du cadre d'échappement et le palier de butée et coussinet lisse N°4 situé dans un logement de palier boulonné à l'arrière du cadre d'échappement.



Figure I.15: Schéma de rotor HP et rotor BP

I.9.3. Système de démarrage :

Le but principal du système de démarrage est d'accélérer la turbine jusqu'à la vitesse minimale d'autonomie. Le lancement de la turbine est assuré par le moteur asynchrone qui fonctionne au travers d'un convertisseur de couple pour assurer le couple de démarrage nécessaire pour la turbine. Le moteur de lancement fait croître la vitesse du rotor de la turbine jusqu'à 22% de sa vitesse nominale dans une minute, l'ensemble se stabilisé pendant les cinq minutes qui suivent à la vitesse de 22%, afin de permettre le balayage des gaz résiduels, et l'alimentation avec le gaz combustible.

Après le balayage, la flamme est ensuite enflammée, et le processus de démarrage commence l'accélération jusqu'à une vitesse de 60% de la vitesse nominale. Le passage de 22% à 60% se fait dans environ 8mn. A cette vitesse le moteur de lancement est découplée du compresseur axial et la turbine atteint la phase de son autonomie, où elle accélère jusqu'à sa vitesse nominale.

I.9.4. Système de graissage :

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

L'huile de graissage conditionné par le système circule jusqu'à atteindre les paliers de la turbine, et les équipements de charge entraînés.

Le système de graissage est équipé de 3 pompes :

I.9.4.1. Pompe principale :

C'est une pompe volumétrique, montée et entraînée par le réducteur auxiliaire. Elle pompe l'huile de graissage du réservoir vers les différents points de graissage de l'installation durant la marche normale.

I.9.4.2. Pompe auxiliaire:

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

I.9.4.3. Pompe de secours :

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

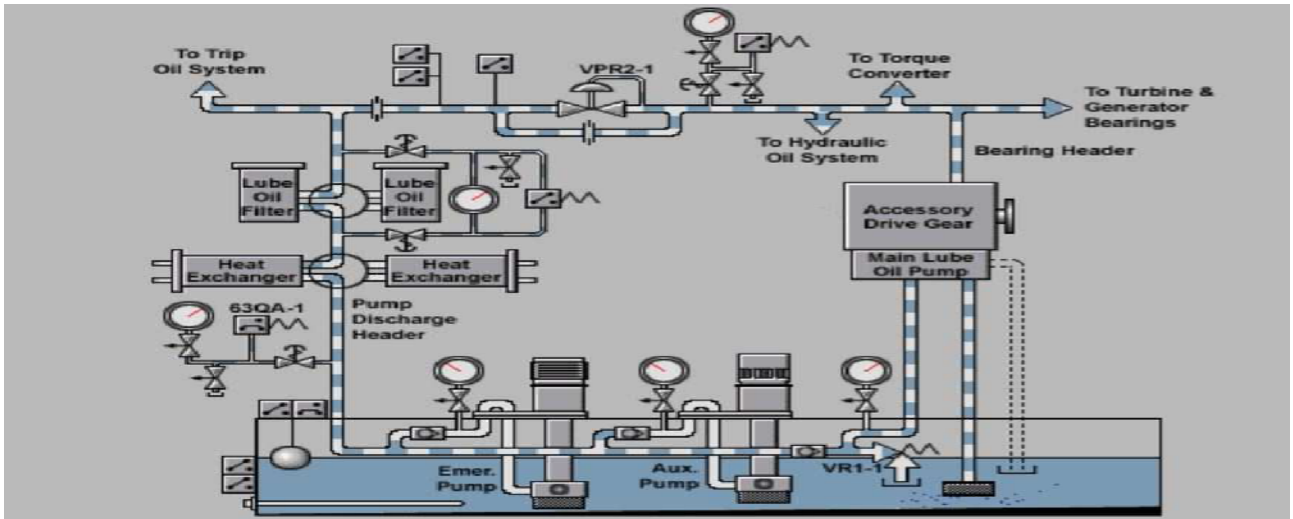


Figure I.16: schéma de système de graissage

I.9.5. Système de refroidissement et d'étanchéité :

Dans une turbine à gaz, certaines parties sont exposées à des contraintes thermiques très élevées. Leur refroidissement est indispensable, afin d'éviter leur détérioration. Pour cette raison, une partie de l'air frais soutirée du compresseur axial, ainsi qu'une deuxième partie aspirée de l'atmosphère sont envoyées pour le refroidissement des endroits critiques, et servir aussi à l'étanchéité (pressuriser les joints d'huile des paliers).

Les pièces refroidies sont :

- Les roues de la turbine du premier et deuxième étage;
- La directrice du premier étage.
- Le carter du rotor de la turbine.

En effet, un excédent d'air de refroidissement serait positif pour la durée de vie des pièces, mais négatif pour le rendement de la machine, et vice-versa. En plus, l'air de refroidissement soutiré du compresseur, ne va pas participer à la combustion, donc il va réduire le travail utile obtenu.

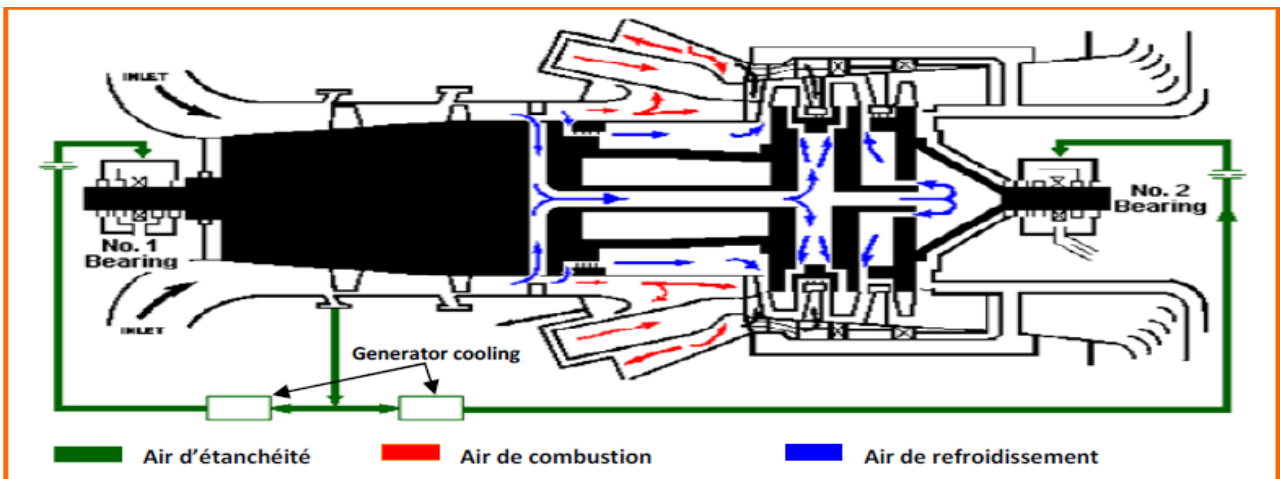


Figure I.17: Schéma de système de refroidissement et d'étanchéité

I.9.6. Systèmes de protection :

I.9.6.1. Système de protection de survitesse :

Lors d'un problème de survitesse un signal est émis par le contrôleur électrique pour arrêter le carburant. Au-delà d'une valeur limite, une sorte de freinage mécanique (arrêt de la machine) est déclenché automatiquement.

La masse de survitesse HP est assemblée dans l'arbre du réducteur des auxiliaires. La masse de survitesse BP est placée dans l'arbre de la turbine seconde étage

I.9.6.2. Système de protection de dépassement de température :

Le système de protection de dépassement de température est l'un des systèmes de protection primaires de la turbine à gaz. Le système déclenche une alarme dès que la température dépasse la limite fixée.

I.9.6.3. Système de protection et de détection des vibrations :

Le système est constitué de plusieurs détecteurs de vibrations. Il agit pour mettre la turbine soit en alarme soit en déclenchement. Les capteurs ou détecteurs de vibrations sont répartis stratégiquement en différents points de la turbine.

I.9.6.4. Système de protection et de détection de flamme :

Le système sert pour les trois fonctions principales suivantes :

- Lorsque la vanne de régulation qui contrôle l'arrivée du combustible pour l'allumage est en fonctionnement et que les circuits d'allumage sont sous tension dans la séquence de démarrage, la vanne d'arrêt de combustible se déclenche si la flamme n'est pas détectée dans le temps réglé du temporisateur d'allumage (généralement 60 secondes). Et les circuits d'allumage ne sont plus sous tension. Cela permet d'éviter un excès de concentration de combustible dans la turbine et dans le système d'échappement pour éviter tout risque d'explosion dans les conduites.
- Lorsque la flamme est établie et détectée au moment de l'allumage dans la séquence de démarrage, la détection de la flamme est utilisée pour commander d'autres phases de la séquence de démarrage pour la montée en régime de la turbine.
- S'il y a une disparition de flamme après que l'allumage ait été établi, la totalité du débit de combustible alimentant la chambre est immédiatement arrêtée pour empêcher le combustible non brûlé de pénétrer dans l'échappement.

I.9.6.5. Dispositif d'anti-pompage :

Le pompage est marqué par la rupture complète de l'écoulement continu à travers le compresseur et résulte en larges oscillations de débit avec le temps ce qui ferait des endommagements importants sur les organes mécaniques

La protection contre le pompage est donc une nécessité. Deux modes de protection sont appliqués :

- Débit entrant réglable (variable) : En amont du compresseur axial est placé un étage d'aubes mobiles en rotation (variables) dites IGV, la fermeture de ces aubes permet de limiter le débit d'air admis et cela lors du démarrage, où la vitesse du rotor est encore faible, l'ouverture de ces aubes croit progressivement avec l'accélération de la turbine, jusqu'à atteindre une ouverture complète correspondante au maximum de débit et vitesse de rotation.
- Vanne anti-pompage (VAP): Un piquage au niveau du 10e étage du compresseur vers l'atmosphère, sert à évacuer une partie de l'air admis à l'atmosphère afin d'éviter la pulsation du débit (retour de l'écoulement).

II.1. Introduction:

La maintenance industrielle, qui a pour but d'assurer le bon fonctionnement des outils de production, est une fonction stratégique dans les entreprises. Intimement liée au continuel développement technologique, à l'apparition de nouvelles méthodes et organisations, à la nécessité de réduire les coûts de production, elle est en constante évolution. Elle n'a plus aujourd'hui comme seul objectif de réparer les pannes mais aussi de prévoir et d'éviter les dysfonctionnements.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord rappeler quelques notions et généralités sur la maintenance; définition, rôle, objectifs, et type de maintenance. Nous présenterons en suite une étude théorique sur le concept FMD en ce basant sur les lois et les méthodes utilisées dans ce domaine. (1)

II.2. Définition de la maintenance:

D'après la norme AFNOR X60-010, la maintenance est définie comme " l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ". Maintenir c'est donc effectuer des opérations (de nettoyage, graissage, visite, réparation, révision, amélioration...etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de production.

Ainsi que choisir les moyens de prévenir, de corriger ou de rénover suivant l'utilisation du matériel.

L'état d'esprit de la maintenance est de maîtriser les interventions.

La maintenance a pour but :

- Le maintien du capital machine
- La suppression des arrêts et des chutes de production (garantir la capacité de livraison)
- L'amélioration de la sécurité et la protection du personnel et de l'environnement. (1)

II.3. Le rôle de la maintenance:

Pendant longtemps, la maintenance est considérée par les gestionnaires plus comme une fatalité qu'un ensemble d'activités ayant pour d'accomplir toutes les tâches nécessaires pour que l'équipement soit maintenu ou rétabli dans un état spécifié ou en mesure de :

- Permettre une exécution normale des opérations dans les meilleures conditions de coûts, de sécurité et de qualité (le cas de la production)
- Obtenir un service dans les meilleures conditions de confort et de coût (c'est le cas, par exemple, des services vendus en général mais surtout des transports, des hôpitaux).

Donc pour nous, entretenir, consiste à dépanner, réparer, réaliser des opérations Préventives dont le but principal est d'assurer le fonctionnement de l'outil de production d'une manière globale entretenir c'est subir.

Outre cela le progrès technologique ainsi que l'évolution de la conception de la gestion des entreprises ont fait que la maintenance est devenue de nos jours une fonction importante de l'entreprise dont le rôle dans l'atteinte des objectifs de l'entreprise est loin d'être négligeable.

Donc la fonction maintenance est l'affaire de tous et doit être omniprésent dans les entreprises et les services. Elle est devenue un enjeu économique considérable pour tous les pays qui souhaitent disposer d'outils de production disponibles, performants.

Si l'entretien ne se traduisait que par des interventions, nous pouvons dire que la maintenance est tout autre chose. C'est d'abord un état d'esprit, une manière de penser, ensuite une discipline nouvelle dotée de moyens permettant d'intervenir dans de meilleures conditions, d'appliquer les différentes méthodes en optimisant le coût global. La maintenance vise à éviter les pannes et les temps morts que celle-ci entraîne.

La maintenance ne doit pas être perçue comme une fonction secondaire et elle doit bénéficier de toute l'attention voulue.

Actuellement la modernisation de l'outil de production impose une évolution fondamentale dans le domaine de maintenance. Cette évolution se traduit par un changement profond pour les entreprises (remplacement de la fonction entretien par la fonction maintenance), par une évolution de mentalités. Cette mutation nécessite des structures nouvelles, des moyens nouveaux et pour le personnel un état d'esprit « Maintenance ».

Donc la maintenance désigne plusieurs catégories de travaux notamment :

- Surveillance et travaux simples (graissage etc.) généralement dévolus aux utilisateurs du matériel ou des installations;
- Contrôle de fonctionnement et travaux plus complexes que les précédents, souvent effectués par spécialistes;
- Dépannage et réparation en cas d'incident confiés à des ouvriers ou équipes spécialisées.
- Entretien systématique comportant des révisions partielles ou totales, faites sur place ou dans un atelier spécialisé.
- Reconstruction complète de machines ou d'installations, constituant une véritable remise à neuf.

II.4. Objectifs de la maintenance:

Assurer le maintien (disponibilité) des équipements de production et diminuer les pannes car ces dernières occasionne :

- Coûts de maintenance (intervention)
- Coûts d'indisponibilité (non production)
- Problèmes de sécurité (biens et personnes)

La maintenance intègre également :

- Amélioration de la sécurité des biens et des personnes,
- Intégration de nouveaux biens,
- Organisation des activités de maintenance,
- L'animation et l'encadrement des équipes d'intervention. (1)

II.5. Les niveaux de maintenance :

Pour faciliter principalement la gestion des personnels affectés à la maintenance, on définit :

- **niveau 1:** réglages simples sans démontage, rondes et surveillance pendant la marche.
- **niveau 2:** dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet et opérations mineures.
- **niveau 3:** identification et diagnostic de pannes, réparation ou remplacement d'éléments fonctionnels.
- **niveau 4:** travaux de maintenance corrective ou préventive nécessitant des démontages importants.
- **niveau 5:** rénovation, reconstruction, modifications importantes faisant appel à une main-d'œuvre qualifiée.

II.6. Types de maintenance:

Il existe plusieurs façons d'organiser les actions de maintenance pour obtenir la disponibilité maximale du matériel au coût minimum. Il en ressort les types de maintenance suivants :

- la maintenance corrective
- la maintenance préventive
- la maintenance prédictive

II.6.1. Maintenance corrective:

L'opération de maintenance intervient après défaillance. C'est l'attitude qui consiste à attendre la panne pour procéder à une intervention. Elle peut se décomposer en deux branches: la maintenance palliative et la maintenance curative.

II.6.1.1. Maintenance palliative: l'action de dépannage permet de remettre provisoirement le matériel à un niveau de performance acceptable mais inférieur au niveau optimal.

II.6.1.2. Maintenance curative: l'intervention qui suit la défaillance permet le rétablissement du niveau de performance optimal du matériel. (2)

II.6.2. Maintenance préventive:

Les interventions de maintenance sont déclenchées avant les défaillances en fonction d'un paramètre. On cherche alors à tendre vers un taux de défaillance nul en effectuant le maintien du niveau de performance requis avant l'apparition du défaut. Elle se décompose en deux branches: la maintenance systématique et la maintenance conditionnelle. (2)

II.6.2.1. Maintenance systématique:

Le paramètre déclencheur est le temps, que ce soit le temps réel (quel que soit le temps de fonctionnement de la machine) ou le temps de marche. Les interventions sont déclenchées suivant un échancier de visites intervenant avant la défaillance supposée.

II.6.2.2. Maintenance conditionnelle:

Le ou les paramètres déclencheurs Sont des paramètres de fonctionnement dont les valeurs sont représentatives du niveau de performance de la machine. On fixe généralement des seuils maximaux admissibles à partir desquels l'opération de maintenance est déclenchée.

Maintenance systématique et maintenance conditionnelle peuvent être utilisées conjointement en complément l'une de l'autre.

II.6.3. Maintenance prédictive:

Son objectif est de pouvoir établir un diagnostic d'état du matériel à un instant donné pour en déduire une durée de vie probable sans panne. On doit pouvoir prévoir et effectuer les opérations de maintenance les plus rapides et les moins onéreuses juste avant l'apparition d'une défaillance. Les informations fournies par les outils de la maintenance conditionnelle peuvent être utilisées mais doivent être regroupées, ordonnées, corrélées. Seul un outil informatique tel qu'un système expert permet une gestion efficace tant au niveau de la synthèse de l'information collectée, des interactions entre les différents paramètres, de l'arborescence des causes de défaillances, qu'à l'élaboration d'éléments de décision permettant de limiter les opérations de maintenance au résultat requis.

II.6.4. Diagramme des types de la maintenance :

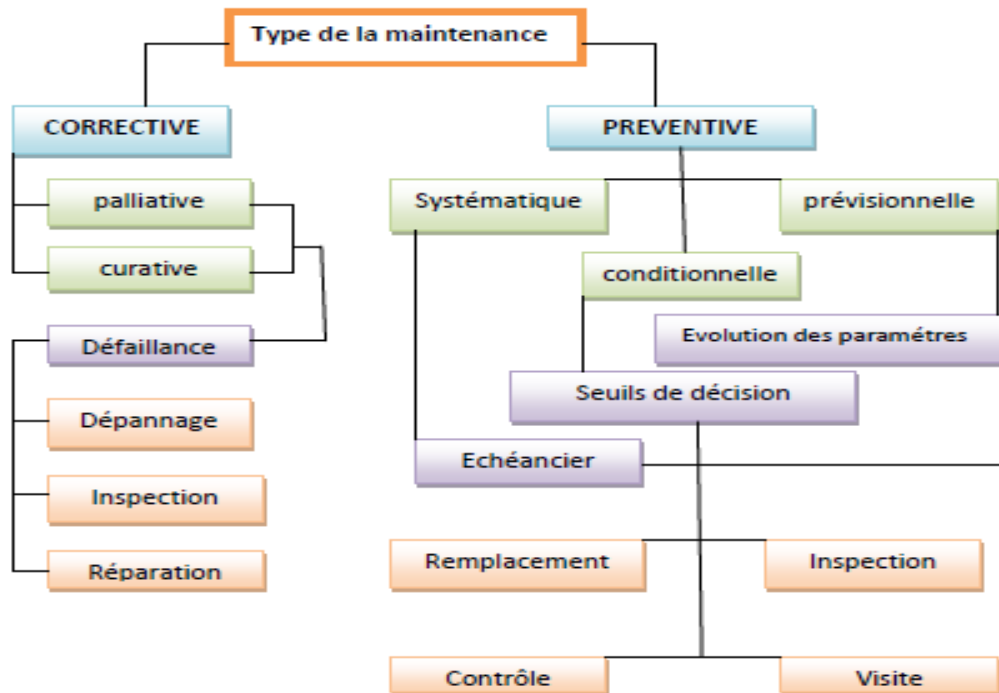


Figure II.1: Différents Types De Maintenance.

II.7. Les opérations de maintenance:

II.7.1. Le dépannage:

C'est une action ou opération de maintenance corrective sur un équipement en panne en vue la remettre en état de fonctionnement.

Cette action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisions et de conditions de réalisation hors règles de procédures, de cout et de qualité, et dans ce cas sera suivie de la réparation.

Souvent les interventions de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses et n'exigent pas la connaissance du comportement des équipements et des modes de dégradation. (2)

II.7.2. La réparation:

C'est une intervention définitive et limitée de maintenance corrective après panne ou défaillance. L'équipement réparé doit assurer les performances pour les quelles il a été conçu.

II.7.3. Les inspections:

Ce sont des 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.

II.7.4. Les visites:

Ce sont des opérations de surveillance qui dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité prédéterminée.

Ces interventions correspondent à une liste d'opérations définies au préalable qui peuvent entraîner d'organes et une immobilisation du matériel.

II.7.5. Les contrôles:

Ils correspondent à des vérifications de conformité par rapport à des données préétablies suivies d'un jugement.

Le contrôle peut, comporter une activité d'information, inclure une décision, acceptation, rejet, ajournement, déboucher comme les visites sur des opérations de maintenance corrective.

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

II.7.6. Les révisions:

Ensemble des actions d'examen, de contrôle 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 est d'usage de distinguer suivant l'étendue de cette opération les révisions partielles, des révisions générales. Dans les deux cas, cette opération implique la dépose de différents sous-ensembles.

II.8. Loi de Pareto et la courbe ABC:**II.8.1. Diagramme de Pareto:**

Le diagramme de Pareto est un outil statistique qui permet d'identifier l'importance relative de chaque catégorie dans une liste d'enregistrements, en comparant leur fréquence d'apparition.

Un diagramme de Pareto est mis en évidence lorsque **20 %** des catégories produisent **80 %** du nombre total d'effets. Cette méthode permet donc de déterminer rapidement quelles sont les priorités d'actions.

Si on considère que **20 %** des causes représentent **80 %** des occurrences, agir sur ces **20 %** aide à solutionner un problème avec un maximum d'efficacité.

II.8.2. Définition de la méthode ABC:

La méthode ABC est un moyen objectif d'analyse, elle permet de classer les éléments qui représentent la fraction la plus importante du caractère étudié, en indiquant les pourcentages pour un caractère déterminé.

II.8.3. But de la méthode ABC :

L'exploitation de cette loi permet de déterminer les éléments les plus pénalisants afin d'en diminuer leurs effets:

- Diminuer les coûts de maintenance.
- Améliorer la fiabilité des systèmes. Justifier la mise en place d'une politique de maintenance.

II.9. Etude de FMD :**II.9. 1. La fiabilité:**

La fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions et pour une durée donnée. Cette définition peut être formulée différemment : la fiabilité d'une entité est la probabilité moyenne de non défaillance de cette entité sur un intervalle de temps donné. Les paramètres importants de la fiabilité sont donc les conditions d'utilisation du système, le temps ou le nombre de cycles. (1)

II.9.1.2. Les différents types de fiabilité:

a. Fiabilité intrinsèque : elle est propre à un matériel et à un environnement donné et ne dépend que de ce matériel.

b. fiabilité extrinsèque : elle résulte des conditions d'exploitation, de la qualité de la maintenance, d'une manière générale d'événement relatif à l'intervention humaine.

c. fiabilité implicite: basée sur l'expérience et dont le but est de réduire la fréquence et la durée des arrêts.

d. fiabilité explicite: dont le concept est formé mathématiquement, elle permet de déterminer rigoureusement le degré de confiance dans le matériel.

II.9.1.1. Objectifs de la fiabilité :

La fiabilité a pour objectif de:

- Mesurer une garantie dans le temps
- Evaluer rigoureusement un degré de confiance
- Déchiffrer une durée de vie

- Evaluer avec précision un temps de fonctionnement
- Déterminer la stratégie de l'entretien
- Choisir le stock.

II.9.1.2. Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité :

Dans les études de fiabilité des différents équipements, une variable aléatoire continue ou discrète peut être distribuée suivant diverses lois qui sont principalement :

II.9.1.2.1. La loi exponentielle :

Elle est la plus couramment utilisée en fiabilité électronique pour décrire la période durant laquelle le taux de défaillance des équipements est considéré comme constant. Elle décrit le temps écoulé jusqu'à une défaillance, ou l'intervalle de temps entre deux défaillances successives.

II.9.1.2.2. La loi de WEIBULL :

C'est une loi continue à trois paramètres, donc d'un emploi très souple. En fonction de la valeur de ses paramètres, elle peut s'ajuster à toutes sortes de résultats expérimentaux. Cette loi a été retenue pour représenter la durée de vie des pièces

II.9.1.2.3. La loi normale :

C'est une loi continue à deux paramètres; la valeur moyenne et l'écart type caractérise la dispersion autour de la valeur moyenne. Elle est la plus ancienne, utilisée pour décrire les phénomènes d'incertitudes sur les mesures, et ceux de fatigue des pièces mécaniques. (1)

II.9.1.2.4. La loi log-normale (ou loi de GALTON):

Soit une VA continue positive ; si la variable $y = \text{Log}x$ est distribuée selon une loi normale, la variable x suit une loi log-normale. De nombreux phénomènes de mortalité ou de durée de répartition sont distribués selon des lois log-normale. (1)

II.9.1.2.5. La loi binomiale :

La loi binomiale est une loi discrète. On l'applique pour décrire un phénomène ayant deux occurrences s'excluant mutuellement (succès ou échec, état défaillant ou en fonctionnement par exemple). En fiabilité cette loi représente la probabilité de voir k défaillances de matériels lors de l'exécution de n essais, Sachant que la probabilité élémentaire de défaillance d'un matériel est P . (1)

-Sa variance :
$$v = nP(1 - P)$$

-Son écart type :
$$\sigma = \sqrt{nP(1 - p)}$$

II.9.1.2.6. La loi de POISSON ou loi de faibles probabilités :

La réalisation d'évènements aléatoires dans le temps se nomme **processus de POISSON** et caractérise une suite de défaillances indépendantes entre elles et indépendantes du temps.

La loi de POISSON est une loi discrète, elle exprime la probabilité d'apparition d'un évènement lorsque celui-ci peut se manifester de nombreuses manières mais avec une faible probabilité. (1)

Ses paramètres sont, en posant Sa variance : $m = \lambda t$

- Sa fréquence :

$$\Pr[x = k] = \frac{m^k}{k!} e^{-m}$$

$$F(x) = \sum_{k=0}^x \frac{m^k}{k!} e^{-m}$$

- Sa fonction de répartition :

II.9.1.3. paramètres nécessaires alla mesure de fiabilité :

II.9.1.3.1. Densité de probabilité :

La densité de probabilité de l'instant de la défaillance T s'obtient en dérivant la fonction de répartition F (t) :

$$f(t) = \frac{df(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

II.9.1.3.2. Fonction de répartitions :

C'est la probabilité pour que le dispositif soit en panne à l'instant t_i

$$F t_i = \Pr (T < t_i)$$

Notons que ces deux fonctions sont complémentaires :

$$F(t) R(t) = 1$$

II.9.1.3.3. La fonction de fiabilité :

Nous appelons R (t) la fonction de fiabilité, qui représente la probabilité de fonctionnement sans défaillances pendant un temps (t), ou la probabilité de survie jusqu'à un temps (t).

La probabilité d'avoir au moins une défaillance avant le temps (t), qui représente la probabilité cumulative des défaillances, est appelé : « probabilité de défaillance ».

II.9.1.3.4. Taux de défaillance :

Prenons maintenant une pièce ayant servi pendant une durée t et encore survivante.

La probabilité qu'elle tombe en panne entre l'âge t qu'elle a déjà et l'âge $T + dt$ est représentée par la probabilité conditionnelle qu'elle tombe en panne entre T et $T + dt$, sachant qu'elle a survécu jusqu'à T .

D'après le théorème des probabilités conditionnelles cette probabilité est égale à :

$$\lambda(t)d(t) = \frac{F(t + dt) - F(t)}{R(t)} = \frac{dF(t)}{1 - F(t)}$$

Avec $\lambda(t)$ taux de défaillance de la pièce d'âge t .

On donc: $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$

$\lambda(t)$ S'exprime également par l'inverse d'un temps, mais n'est pas une densité de probabilité.

L'expérience montre que pour la plupart des composants, le taux de défaillance suit une courbe en baignoire représenté sur la figure suivante : (1)

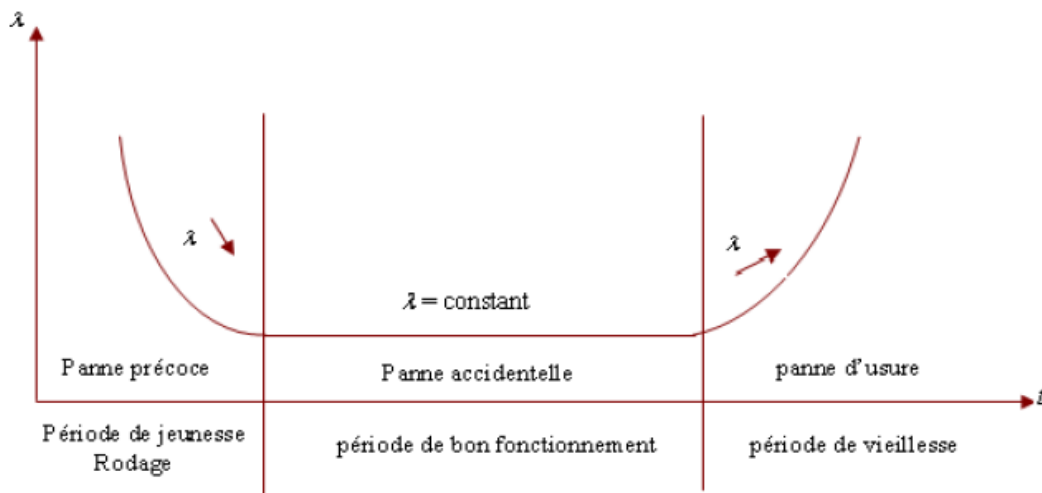


Figure II.2. Courbe en baignoire. (1)

Cette courbe représente trois périodes :

- **La période de jeunesse ou de rodage :** correspond à l'apparition de défaillances, dues à des mal façons ou à des contrôles insuffisants. Dans la pratique, le fabricant procède à un rodage de son matériel afin d'éviter que cette période ne se produise après l'achat du matériel.
- **La période de bon fonctionnement :** dans cette période, le taux d'avaries est sensiblement constant, les avaries surviennent de manière aléatoire et ne sont pas prévisibles par examen du matériel ; ces défaillances sont dues à un grand nombre de causes et sont liées à la fabrication des dispositifs.
- **La période de vieillissement :** le taux d'avaries est croissant, cette période correspond à une dégradation irréversible des caractéristiques du matériel, d'où une usure progressive.

• La MTBF :

Le temps moyen jusqu'à défaillance (ou moyenne des temps de bon fonctionnement) est :

$$MTBF = \frac{\Sigma \text{ temps de bon fonctionnement}}{\text{nombre d'intervalles de temps de bon fonctionnement}}$$

$$MTBF = \int_0^{+\infty} R(t) dt$$

II.9.1.4. Loi de Weibull :

La loi de weibull est utilisée en fiabilité, en particulier dans le domaine de la mécanique.

Cette loi a l'avantage d'être très souple et de pouvoir s'ajuster à différents résultats d'expérimentations.

La loi de Weibull est une loi continue à trois paramètres :

- le paramètre de position γ qui représente le décalage pouvant exister entre le début de l'observation (date à laquelle on commence à observer un échantillon) et le début du processus que l'on observe (date à laquelle s'est manifesté pour la première fois le processus observé) ;
- le paramètre d'échelle η qui, comme son nom l'indique, nous renseigne sur l'étendue de la distribution ;
- le paramètre de forme β qui est associé à la cinétique du processus observé. (1)

-Densité de probabilité:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

-Fonction de réparation:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

-Loi de fiabilité:

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

-Taux de défaillance:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \frac{1}{e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}} \Rightarrow \lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

Remarque :

$$\text{si } \begin{cases} \gamma = 0 \\ \beta = 1 \end{cases} \Rightarrow \lambda(t) = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{MTBF}$$

$$a = \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \text{ et de } b = \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}$$

Moyenne des temps de bon fonctionnement: $MTBF = \gamma + \eta\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$

En fonction de β ; d'où $MTBF = \gamma + a \eta$

Le paramètre de position γ étant souvent nul, on se ramène à

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right)$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$$

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

Donc $\gamma = 0$ ou, en faisant le changement de variable, $t_1 = t - \gamma$, on obtient la distribution de Weibull à 2 paramètres, définie pour t (ou t_1) positif ou nul, dont les caractéristiques sont illustrés sur la (Figure II-3)

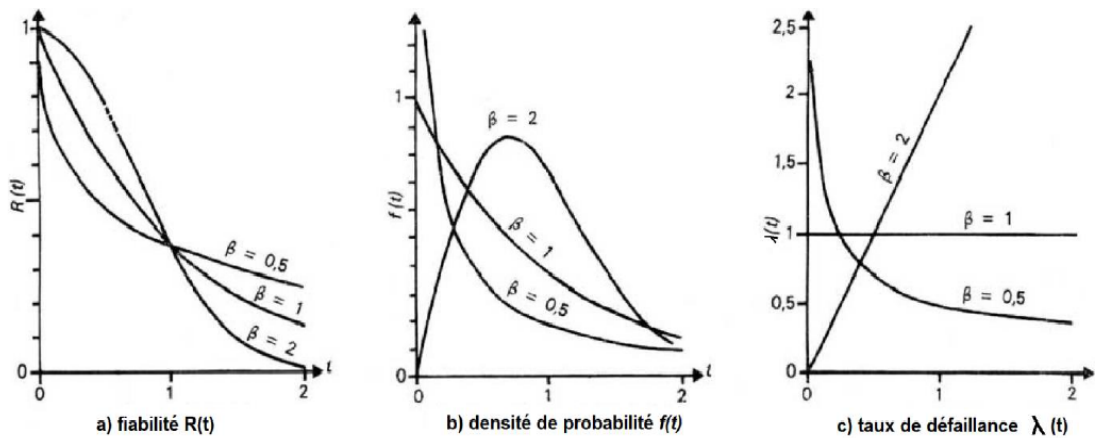


Figure II.3 : Principales propriétés de la distribution de Weibull. (1)

II.9.1.4.1. Application à la fiabilité :

Suivant les valeurs de β , le taux de défaillance est

Soit décroissant ($\beta < 1$),

Soit constant ($\beta = 1$),

Soit croissant ($\beta > 1$).

La distribution de Weibull permet donc de représenter les trois périodes de la vie d'un dispositif (courbe de baignoire)

Le cas $\gamma > 0$ correspond à des dispositifs dont la probabilité de défaillance est infime jusqu'à un certain âge γ .

II.9.1.4.2. Estimation des paramètres de la loi de weibull :

Un des problèmes essentiel est l'estimation des paramètres (β, η, γ) de cette loi, pour cela, nous disposons de la méthode suivante. (1)

Graphique à échelle fonctionnelle :

Si pour la distribution de Weibull à 2 paramètres, on fait la transformation

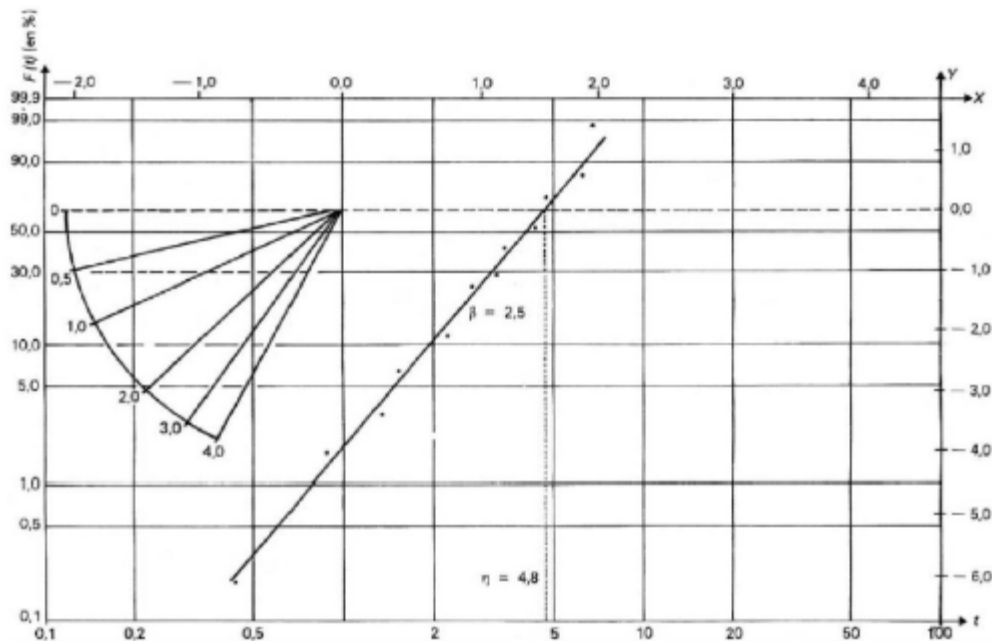


Figure II.4 : Représentation sur graphique à échelle fonctionnelle de la distribution de Weibull (graphique d'Allan Plait).

- A : Axe de t
 - B : axe de F(t) (en %)
 - a : Ln (t)
 - b : Ln (Ln (1/ [1-F(t)]))
 - X et Y : permettent de déterminer béta (Y = béta X)
- } sur Figure II-4

L'historique permet de déterminer des Temps de bon fonctionnement et des fréquences cumulées de défaillance $F(i)$, approximation de $F(t)$

II.9.1.4.3. Préparation des données :

- 1) Calcul des Temps de bon fonctionnement
- 2) Classement des temps de bon fonctionnement en ordre croissant
- 3) N = nombre de Temps de bon fonctionnement
- 4) Recherche des données $F(i)$, $F(i)$ représente la probabilité de panne au temps correspondant au Temps de bon fonctionnement de l' i ème défaillant.

On a 3 cas différents :

- 1- Si $N > 50$, regroupement des Temps de bon fonctionnement par classes avec la fréquence cumulée :

$$F(i) = \frac{Ni}{N} = \frac{\sum Ri}{N} \approx F(t)$$

- 2- Si $20 < N < 50$, On affecte un rang "Ni" à chaque défaillance (approximation des rangs moyens):

$$F(i) = \frac{Ni}{N+1} \approx F(t)$$

- 3- Si $N < 20$, On affecte un rang "Ni" à chaque défaillance (approximation des rangs médians):

$$F(i) = \frac{Ni - 0.3}{N + 0.4} \approx F(t)$$

Et on fait le Tracé du nuage des points $M(F(i), t)$:

a. Recherche de γ :

Si le nuage de points correspond à une droite, alors $\gamma = 0$. ($\gamma = 0$)

Si le nuage de points correspond à une courbe, on la redresse par une translation de tous les points en ajoutant ou en retranchant aux abscisses "t", une même valeur (γ) afin d'obtenir une droite comme le montre la figure suivante.

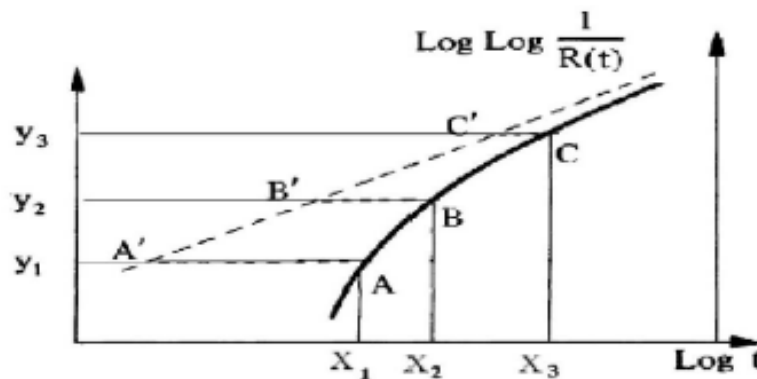


Figure II.5 : redressement de la courbe par translation.

Ce redressement peut se faire par tâtonnement ou avec la relation :

$$y = X_2 - \frac{(X_3 - X_2) \cdot (X_2 - X_1)}{(X_3 - X_2) - (X_2 - X_1)}$$

Considérons les points :

A(X1, Y1) ; B(X2, Y2) ; C(X3, Y3)

$$Et \begin{cases} Y_3 > Y_2 > Y_1 \\ 2Y_2 = Y_1 + Y_3 \end{cases}$$

En arrangeant on obtient

$$y = X_2 - \frac{(X_3 - X_2) \cdot (X_2 - X_1)}{(X_3 - X_2) - (X_2 - X_1)}$$

b. Recherche de η :

La droite de régression linéaire coupe l'axe A à l'abscisse $t = \eta$.

c. Recherche de β :

- béta est la pente de la droite de corrélation.
- On trace une droite parallèle à la droite de corrélation, et passant par $\eta = 1$ On lit ensuite béta Sur l'axe B.

II.9.2. La maintenabilité:

La maintenabilité est « l'aptitude d'un dispositif à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir sa fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions, avec des procédures et des moyens précis ».

La maintenabilité caractérise la facilité de remettre ou de maintenir un bien en bon état de fonctionnement.

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$$

La maintenabilité est caractérisée par la moyenne des temps techniques de réparation MTTR :

$$MTTR = \frac{\Sigma TTR}{N}$$

II.9.2.1. Taux de réparation μ :

$$\mu = \frac{1}{MTTR}$$

La probabilité de réparation d'un composant est principalement fonction du temps écoulé depuis l'instant de défaillance. Il existe un certain délai t avant que le composant puisse être réparé. Ce délai t comprend le temps de détection et le temps d'attente de l'équipe de réparation.

Il s'y ajoute le temps de réparation proprement dit (Figure II-6) donne l'allure de la probabilité de réparation d'un composant tombé en panne en $t=0$.

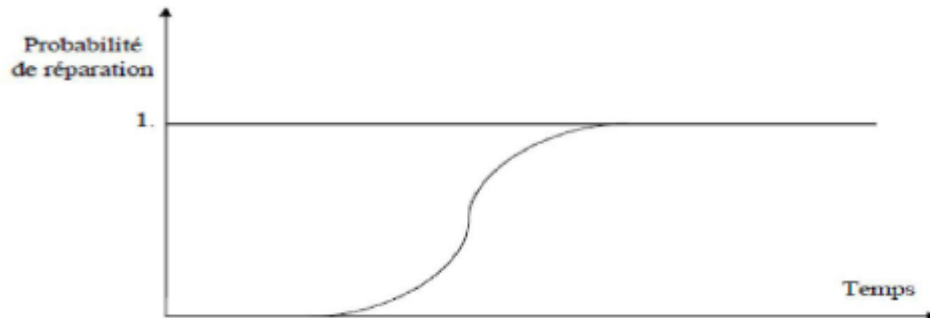


Figure II.6 : probabilité de réparation au cours de temps.

II.9.2.2. Amélioration de la maintenabilité :

L'amélioration de la maintenabilité passe par :

- le développement des documents d'aide à l'intervention,
- l'aptitude de la machine au démontage (modification, risquant de coûter chère).
- l'accessibilité.
- l'intréchangeabilité et la standardisation.
- la facilité de remplacement.
- l'aide au diagnostic.

Il assurera de ce fait la réduction des durées de détection des pannes d'état, diminuant, ainsi les TTR l'amélioration de la maintenabilité d'une manière considérable.

Le maintenancier doit améliorer la maintenabilité par les actions suivantes :

- 1- disponibilité de la documentation tenue à jour du matériel.
- 2- utilisation des systèmes d'aide au diagnostic
- 3- utilisation des capteurs intégrés pour la localisation de la panne
- 4- disponibilité des accessoires outillages

II.9.3. La disponibilité :

La disponibilité est « l'aptitude d'un bien, sous les aspects combinés de sa fiabilité, maintenabilité et de l'organisation de la maintenance, à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions de temps déterminées ».

Pour qu'un équipement présente une bonne disponibilité, il doit :

- avoir le moins possible d'arrêts de production,
- être rapidement remis en état s'il est défaillant.

La disponibilité relie donc les notions de fiabilité et de maintenabilité. (2)

II.9.3.1. Les type de disponibilité :

II.9.3.1.1. disponibilité intrinsèque: cette disponibilité est évaluée en prenant en compte les moyennes de bon fonctionnement et les moyennes de réparation, ce qui donne

$$D_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

II.9.3.1.2. disponibilité instantanée :

Pour un système avec l'hypothèse d'un taux de défaillance λ constante et d'un taux de réparation μ constant, la disponibilité instantanée est:

$$D(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-t(\lambda + \mu)}$$

II.9.3.2. Amélioration de la disponibilité:

- l'allongement de la *MTBF* (action sur la fiabilité).
- la réduction de la *MTTR* (action sur la maintenabilité).
- Fiabilité.
- maintenabilité.
- logistique.

I.9.4. La relation entre MUT, MTBF, et MTTR :

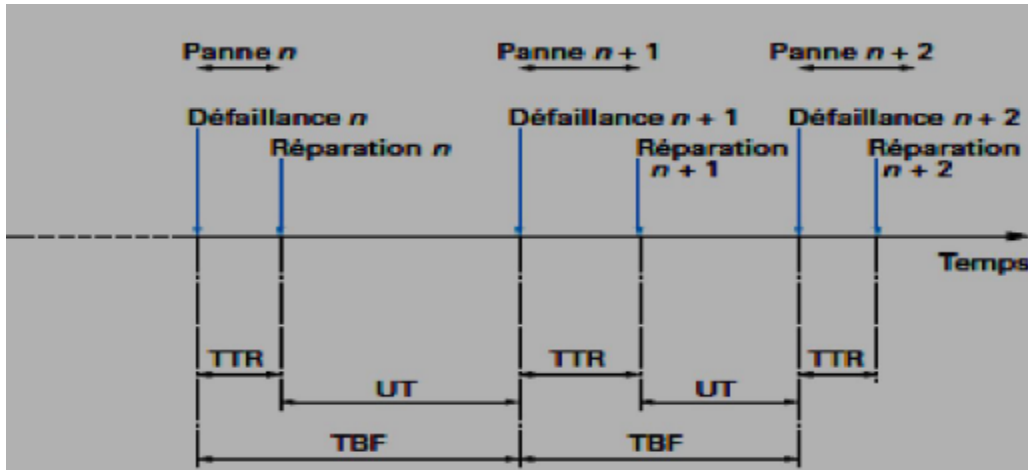


Figure II.7 : Vie d'un système : évolution dans le temps. (2)

$$MTBF = MUT + MTTR$$

En général, on utilise les sigles d'origine américaine MTBF, MTTR et MUT, avec le risque de mal se comprendre évoqué au début du paragraphe ; on peut proposer les expressions françaises suivantes pour utiliser exactement les mêmes notions en levant les ambiguïtés :

- TTR temps de réparation,
- TBF temps de bon fonctionnement,
- UT temps entre défaillance

II.9.5. La relation entre les notions FMD :

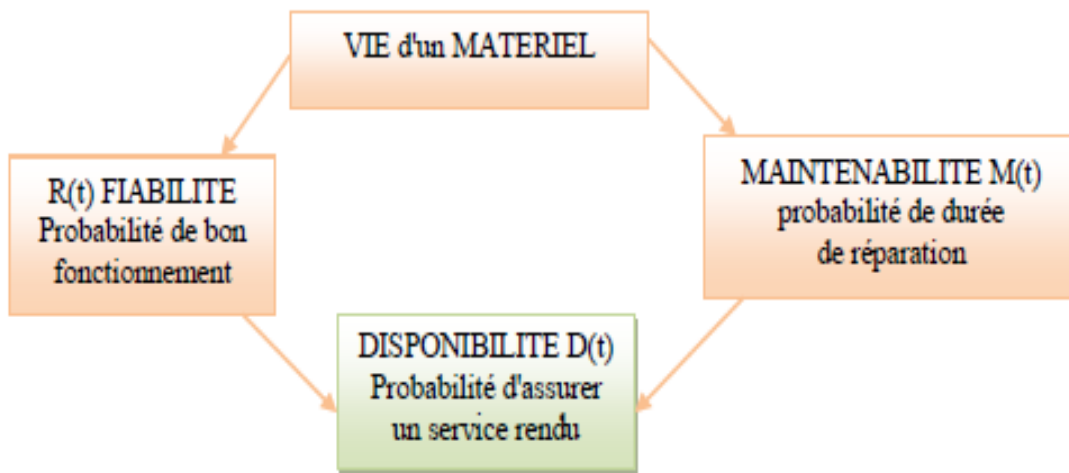


Figure II.8 : La relation entre les notions FMD. (2)

Pour qu'un matériel soit disponible il faut s'assurer que sa fiabilité est optimum et qu'il est aussi maintenable.

II.10. Conclusion :

La maintenance est une fonction essentielle de l'entreprise ; ses objectifs vont au delà de remettre en état l'outil de travail, mais surtout d'anticiper des événements qui interviennent dans un environnement d'incertitudes, et de contribuer à la performance globale du système de production.

Cela nous mène à substituer la maintenance curative par celle préventive visant à préserver la fiabilité de l'équipement, réduire les surcoûts, et assurer la qualité des produits finies. Cette maintenance préventive se traduit par la définition de plans d'actions et l'intervention sur l'équipement.

La sûreté de fonctionnement d'une machine en tenant compte de l'aspect sécurité et les critères visant à éviter un entretien fréquent, difficile et coûteux se résument en trois points connus sous la notion F.M.D. (Fiabilité_ Maintenabilité_ Disponibilité) que le concepteur d'équipement devrait tenir compte lors des études d'engineering.

III.1. Introduction :

Positionner la maintenance au sein de l'appareil de production est un exercice difficile, comme il est toujours difficile de faire simple dans un environnement complexe. C'est l'objectif du dernier chapitre où on tente par l'exploitation de l'historique de panne de la turbine à gaz type **MS5002B** de faire face à l'étude expérimentale des indicateurs **FMD** de telle turbine tout en traçons les courbes de ces trois indicateurs.

III.2. Exploitation de l'historique :

L'historique de panne turbine ;

Le traitement des données brutes de l'historique (**tableau III.1**), passe par :

- Le calcul des heures d'arrêt suite à des pannes (**TA**) qui résultent des différences entre les dates d'arrêt et de démarrage.
- Le calcul des heures de bon fonctionnement (**TBF**), qui résultent des différences entre deux pannes successives.
- Le calcul des heures techniques de réparation.

| N° | Date de démarrage | Date d'arrêt | TTR | TBF (h) | TA (h) | Cause |
|----|-------------------|--------------|-----|---------|--------|---|
| 01 | 17/01/1992 | 28/04/1997 | 786 | 41371 | 3144 | Revision general MI (M ajor I nspection). |
| 02 | 05/09/1997 | 19/01/2000 | 80 | 12881 | 480 | CI (C ombustion I nspection). |
| 03 | 07/02/2000 | 10/09/2003 | 24 | 17357 | 144 | CI (C ombustion I nspection). |
| 04 | 16/09/2003 | 10/07/2006 | 20 | 5752 | 120 | CI (C ombustion I nspection). |
| 05 | 29/07/2006 | 09/09/2007 | 04 | 7920 | 24 | Intervention sur l'accouplement de la charge. |
| 06 | 10/09/2007 | 10/11/2008 | 248 | 6175 | 1488 | Revision general MI (M ajor I nspection). |
| 07 | 10/01/2009 | 11/01/2011 | 32 | 12532 | 192 | CI (C ombustion I nspection). |
| 08 | 19/01/2011 | 29/01/2013 | 412 | 12499 | 2472 | HGPI (H ot G az P ath I nspection). |
| 09 | 12/05/2013 | 10/09/2013 | 3 | 2680 | 24 | Intervention sur le voyou. |
| 10 | 11/09/2013 | 19/02/2017 | 36 | 7309 | 216 | CI (C ombustion I nspection). |

Tableau III.1. Dossier historique de la turbine MS5002B.

III.3. L'application Pratique des méthodes d'analyse :

III.3.1. Méthodes d'analyse prévisionnelle ABC (Pareto):

Définition : Pour l'application de la méthode ABC, il faut en premier lieu faire un classement des pannes par ordre décroissant des heures des pannes puis procéder à l'établissement d'un graphe de Pareto.

| N° | INSPECTION | TA(h) | Cumul (TA) | % TA | NBR d'inspection | Cumul d'inspection |
|----|--------------|-------|------------|-------|------------------|--------------------|
| 1 | MI | 4632 | 4632 | 55,78 | 2 | 2 |
| 2 | HGPI | 2472 | 7104 | 85,54 | 1 | 3 |
| 3 | CI | 1162 | 8256 | 99,4 | 5 | 8 |
| 4 | Intervention | 48 | 8304 | 100 | 2 | 10 |

Tableau III.2 L'analyse ABC (Pareto).

III.3.2. La courbe d'analyse ABC :

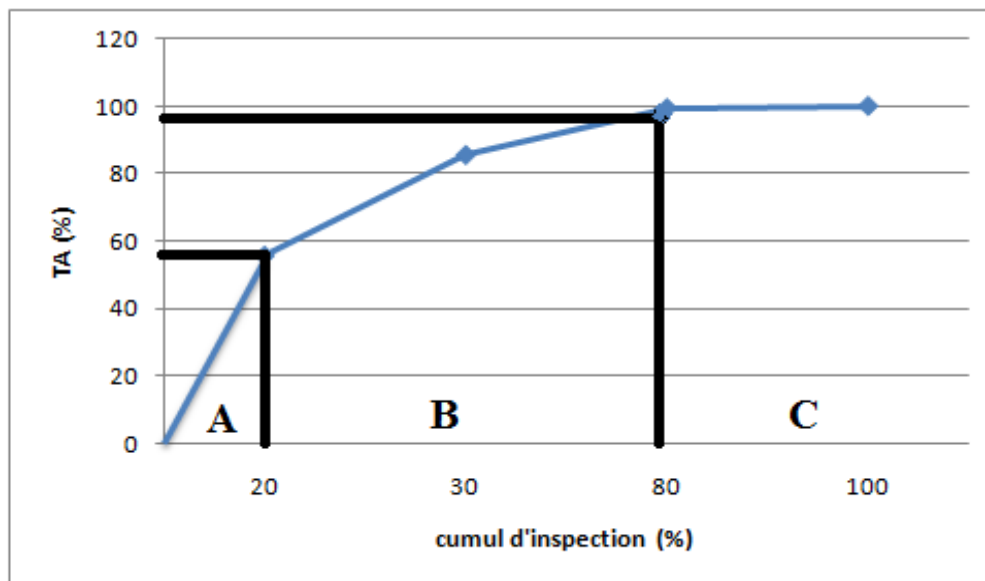


Figure III.1: La Courbe d'ABC.

III.4. Calcul les paramètres de weibull :

Le tableau suivant comporte les TBF classés par ordre croissant, et les F(i) calculés par la méthode des rangs médians $F(i) = \frac{Ni-0.3}{N+0.4}$ (dans notre cas N =9 ≤ 20) et on trace la courbe de Weibull.

| N° | TBF(h) | n | Σ ni | F(i) | F(i) % |
|----|--------|---|------|--------|--------|
| 01 | 2680 | 1 | 1 | 0,0697 | 6,97 |
| 02 | 6175 | 1 | 2 | 0,1693 | 16,93 |
| 03 | 7309 | 1 | 3 | 0,2689 | 26,89 |
| 04 | 7920 | 1 | 4 | 0,3685 | 36,85 |
| 05 | 12499 | 1 | 5 | 0,4681 | 46,81 |
| 06 | 12532 | 1 | 6 | 0,5677 | 56,77 |
| 07 | 12881 | 1 | 7 | 0,6673 | 66,73 |
| 08 | 15752 | 1 | 8 | 0,7669 | 76,69 |
| 09 | 17351 | 1 | 9 | 0,8665 | 86,65 |
| 10 | 41371 | 1 | 10 | 0,9661 | 96,61 |

Tableau III.3: Fonction de réparation réelle.

A partir de papier de weibull, (Fig.2). On déduire les paramètres: β, η et γ.

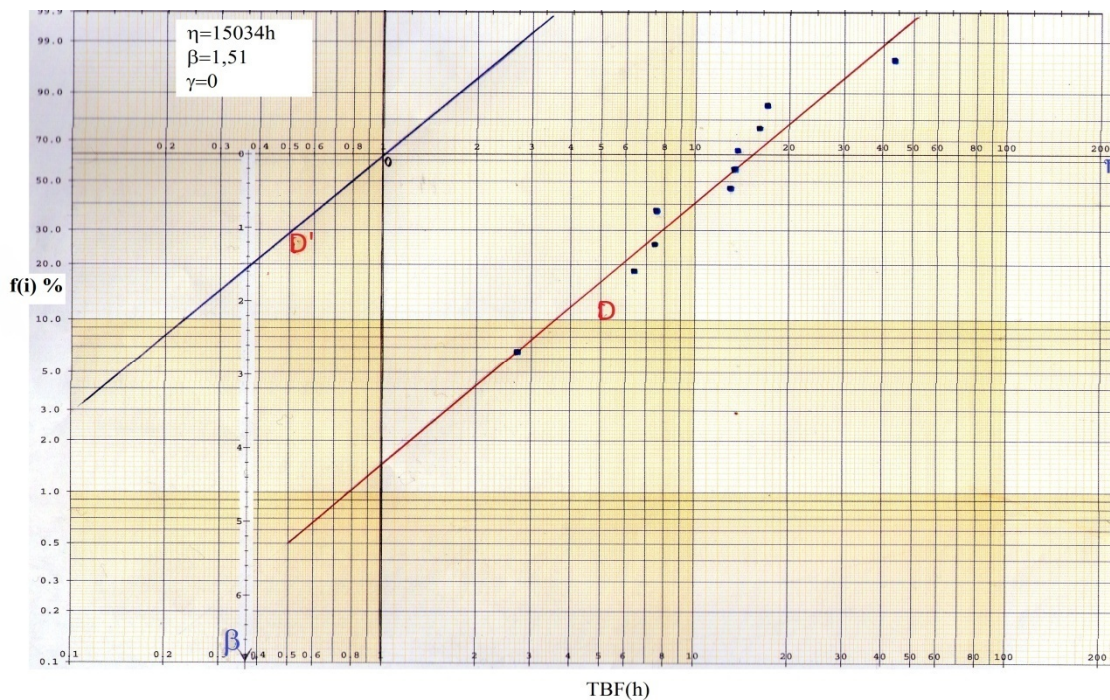


Figure III.2: papier de Weibull.

III.4.1. Test (KOLMOGOROV SMIRNOV) :

Avant la validation de toutes les lois de fiabilité, il est nécessaire de tester l'hypothèse pour savoir si nous devons accepter ou rejeter le modèle proposé par le test de K-S avec un seuil de confiance de $\alpha = 20\%$. Ce test consiste à calculer l'écart entre la fonction théorique $F(i)$ et la fonction réelle $F(t)$ et prendre le maximum en valeur absolue $D_{N_{max}}$

Cette valeur est comparée avec $Dn \cdot \alpha$ Qui est donnée par le tableau de loi Kolmogorov-Smirnov (Voir annexe1). Si $D_{N_{max}} > Dn \cdot \alpha$ On refuse l'hypothèse.

| N° | TBF(h) | F(i) | F(t) | DNmax= F(i) – F(t) |
|----|--------|--------|-------|---------------------|
| 01 | 2680 | 0,0697 | 0,067 | 0,0027 |
| 02 | 6175 | 0,1693 | 0,228 | 0,0587 |
| 03 | 7309 | 0,2689 | 0,281 | 0,0121 |
| 04 | 7920 | 0,3685 | 0,309 | 0,0595 |
| 05 | 12499 | 0,4681 | 0,530 | 0,0619 |
| 06 | 12532 | 0,5677 | 0,531 | 0,0367 |
| 07 | 12881 | 0,6673 | 0,546 | 0,1213 |
| 08 | 15752 | 0,7669 | 0,656 | 0,1109 |
| 09 | 17351 | 0,8665 | 0,710 | 0,1565 |
| 10 | 41371 | 0,9661 | 0,990 | 0,0239 |

Tableau III.4: test de kolmogrov-Smirnov.

D'après le tableau de K-S:

$D_{N_{max}} < D_{N\alpha}$ Ce qui veut dire que le modèle de Weibull est accepté.

Nous avons pris la valeur maximale $D_{N_{max}} = |F(i) - F(t)|$.

$D_{N_{max}} = 0,1565$ tandis que $D_{N\alpha} = D_{10,0,20} = 0,3222$

$0,1565 < 0,3222$ donc l'hypothèse du modèle de Weibull est acceptable.

III.4.2. Exploitation les paramètres de WEIBULL :

III.4.2.1. Le MTBF :

Le tableau de MTBF donne $A = 0,9027$, $B = 0,613$ (voir annexe2).

$MTBF = A \cdot \eta + \gamma$.

$MTBF = 0,9027 \cdot 15034 + 0$

$MTBF = 13571,1918$ h.

III.4.2.2. La densité de probabilité en fonction de MTBF :

$$f(t = \text{MTBF}) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} = 0,000040 = 0,0040\%$$

III.4.2.3. La fonction de réparation en fonction de MTBF :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

$$F(t = \text{MTBF}) = 1 - e^{-\left(\frac{13571,1918-0}{15034}\right)^{1.51}} = 0,58 = 58\%$$

III.4.2.4. La fiabilité en fonction de MTBF :

$$R(t=\text{MTBF}) = 1 - F(t= \text{MTBF}) = 1-0,58 = 0,42$$

$$R(\text{MTBF}) = 42 \%$$

On remarque que la fiabilité de la turbine est faible.

III.4.2.5. Le taux de défaillance en fonction de MTBF :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

$$\lambda(t = \text{MTBF}) = \frac{1.51}{15034} \left(\frac{13571,1918-0}{15034}\right)^{1.51-1} = 0,000095329 \text{ panne/heure}$$

III.4.2.6. Calcul du temps souhaitable pour une intervention systématique :

$$R(t)=80 \% \Rightarrow t=? \quad R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

$$\ln R(t)=\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta=\ln(0.8) \Leftrightarrow -[\ln R(t)]^{1/\beta} = t/\eta \Rightarrow t= \eta[\ln(1/R(t))]^{1/\beta}$$

$$t_{\text{sys}}=5567.40 \text{ heures}$$

Pour garder la fiabilité de la turbine 80% il faut intervenir chaque temps systématique 5567.40 h.

III.5. Étude de modèle de weibull :

III.5.1. La fonction de la densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

$$f(t)=\lambda(t).R(t)$$

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| TBF(h) | 2680 | 6175 | 7309 | 7920 | 12499 | 12532 | 12881 | 15752 | 17351 | 41371 |
| f(t)x10⁻³ | 0,0386 | 0,0491 | 0,0424 | 0,0495 | 0,0428 | 0,0391 | 0,0420 | 0,0351 | 0,0312 | 0,0015 |

Tableau III.5: Calcul la fonction de la densité de probabilité.

III.5.1.1. Courbe de la densité de la probabilité f(t) :

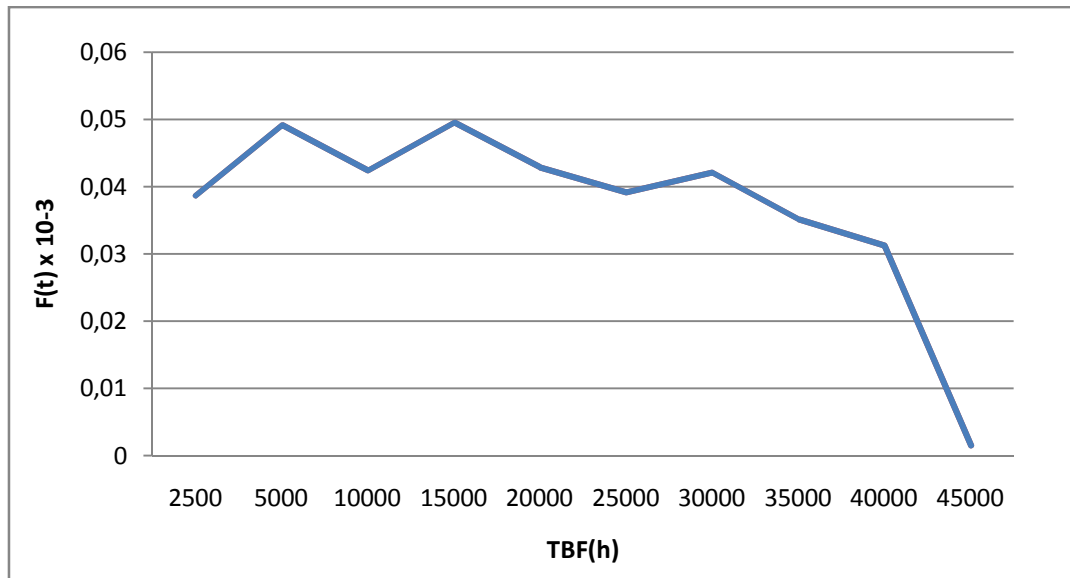


Figure III.3: La Courbe Densité De Probabilité.

III.5.1.2. Analyse de la courbe :

D'après cette courbe on remarque que la fonction f(t) (densité de probabilité) diminue avec le temps.

III.5.2. Fonction de répartition F(t) :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

| | | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TBF(h) | 2680 | 6175 | 7309 | 7920 | 12499 | 12532 | 12881 | 15752 | 17351 | 41371 |
| F(t) | 0,072 | 0,229 | 0,286 | 0,316 | 0,531 | 0,532 | 0,547 | 0,658 | 0,711 | 0,991 |

Tableau III.6: Fonction de répartition F(t).

III.5.2.1. Courbe fonction de répartition F(t) :

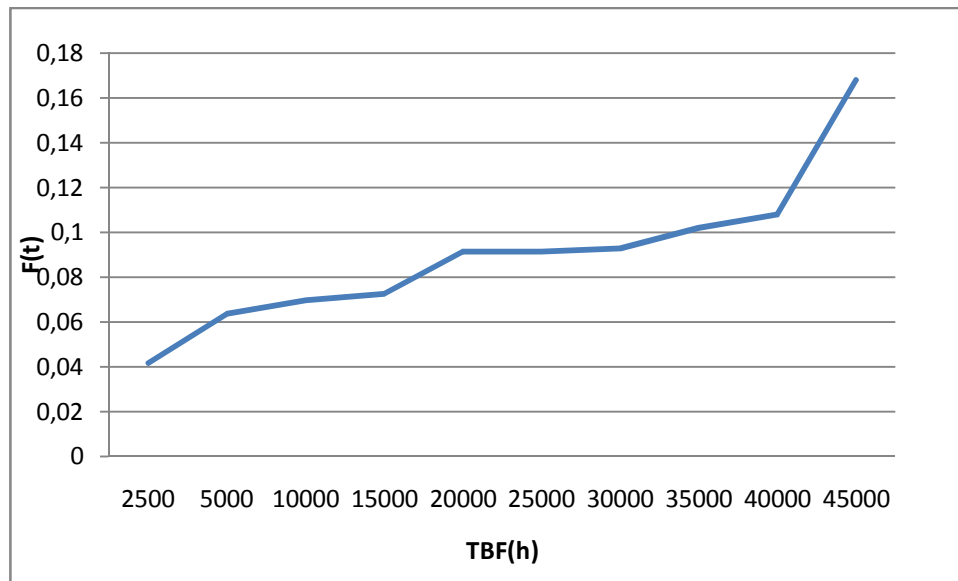


Figure III.4: La Courbe De Fonction Répartition.

III.5.2.2. Analyse de la courbe :

La fonction de défaillance croissant en fonction de temps, et pour t=MTBF

$$F(\text{MTBF})=0,58=58\%$$

III.5.3. La fiabilité :

La fonction fiabilité de celle de répartition: $R(t) = 1-F(t)$, après calcul la fiabilité de la turbine aux temps t=MTBF, on début que la valeur n'est pas satisfaisante donc on peut dire que la turbine n'est pas fiable à t=MTBF

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

$$R(t=\text{MTBF}) = 0,42$$

| | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TBF(h) | 2680 | 6175 | 7309 | 7920 | 12499 | 12532 | 12881 | 15752 | 17351 | 41371 |
| R(t) | 0,928 | 0,771 | 0,714 | 0,684 | 0,469 | 0,468 | 0,453 | 0,342 | 0,289 | 0,009 |

Tableau III.7: Calcul de la fiabilité.

III.5.3.1. Courbe de la fiabilité :

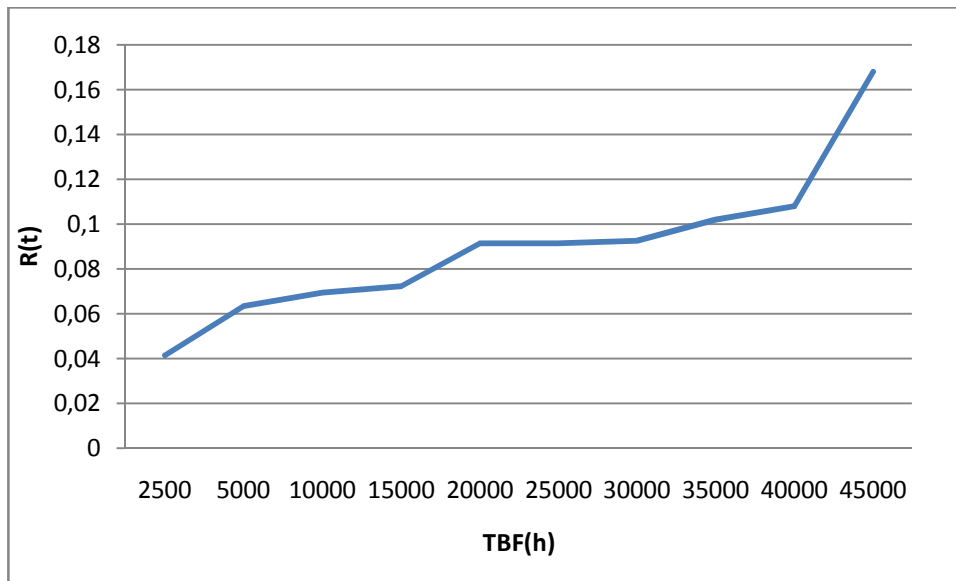


Figure III.5: La Courbe De la Fonction Fiabilité.

III.5.3.2. Analyse de la courbe :

Le graphe croissant en fonction de temps, l'amélioration de la fiabilité de la turbine passe obligatoirement par une analyse des défaillances avec une étude détaillée de leurs causes de leurs modes et de leurs conséquences.

III.5.4. Le taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

| | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| TBF(h) | 2680 | 6175 | 7309 | 7920 | 12499 | 12532 | 12881 | 15752 | 17351 | 41371 |
| $\lambda(t) \times 10^{-3}$ | 0,0416 | 0,0637 | 0,0695 | 0,0724 | 0,0914 | 0,0915 | 0,0928 | 0,102 | 0,108 | 0,168 |

Tableau III.8: Calcul le taux de défaillance.

III.5.4.1. Courbe du taux de défaillance :

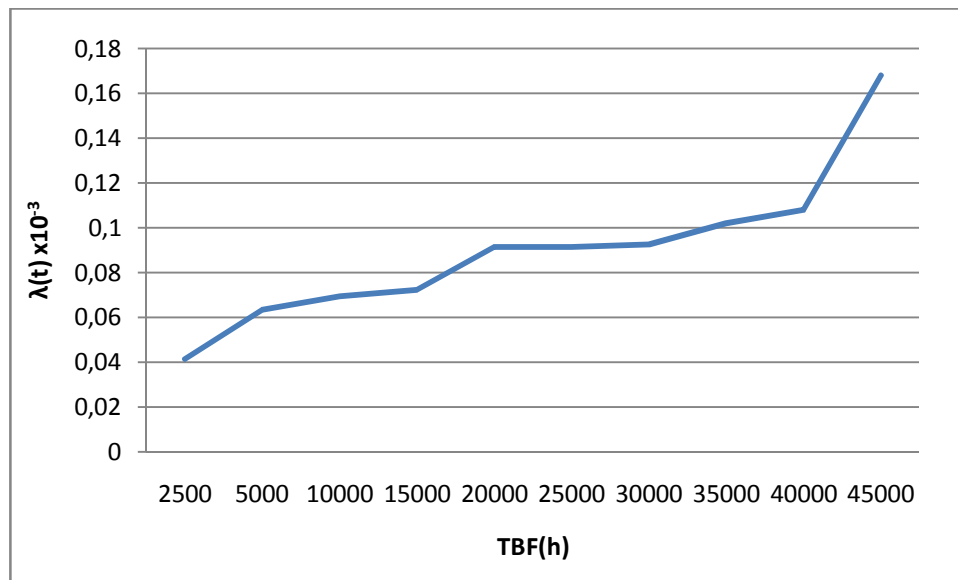


Figure III.6: Le courbe taux de défaillance.

III.5.4.2. Analyse de la courbe :

Le taux de défaillance est croissant en fonction de temps.

III.6. Calcul la Maintenabilité de la turbine :

D'après l'historique des pannes de la turbine:

$$MTTR = \sum TR / N.$$

TR : temps de réparation.

N : nombre de panne.

$$MTTR = 1645 / 10 = 164,5h.$$

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$$

Avec $\mu = 1 / MTTR = 1 / 164,5 = 0,00607$ intervention / heure.

| | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T(h) | 120 | 240 | 360 | 480 | 600 | 720 | 840 | 960 | 1080 | 1200 | 1320 |
| M(t) | 0,5173 | 0,7670 | 0,887 | 0,945 | 0,973 | 0,987 | 0,993 | 0,997 | 0,998 | 0,999 | 0,999 |

Tableau III.9: La maintenabilité de la turbine.

III.6.1. courbe de la fonction de Maintenabilité :

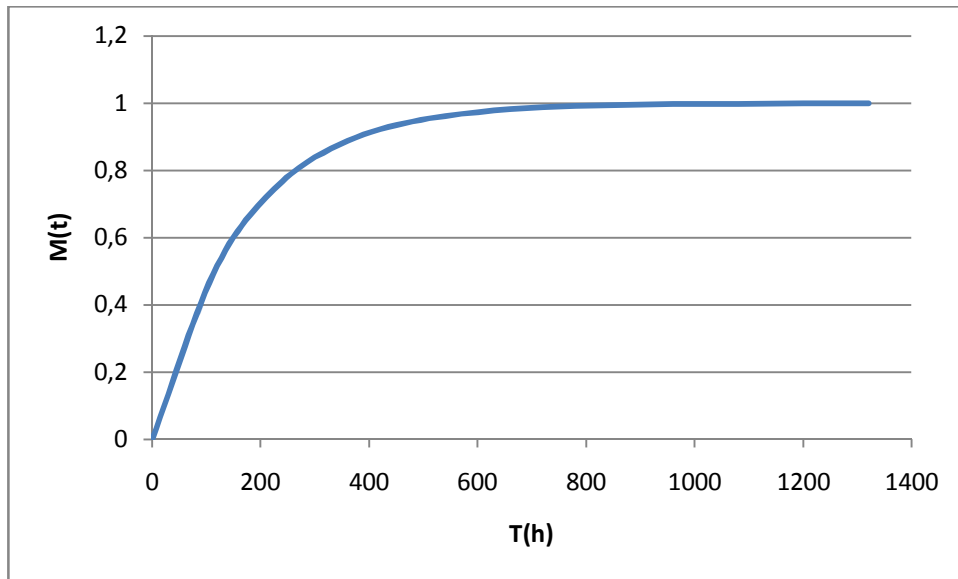


Figure III.7. La Courbe de Maintenabilité.

III.6.2. Analyse de la courbe :

La Maintenabilité est croissant en fonction de temps à l’instant T=1200 heures, M(t)= 99,99%

III.7. Calcul la disponibilité de la turbine :

III.7.1. Disponibilité intrinsèque au asymptotique :

$$Di = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{13571,1918}{13571,1918 + 164,5} = 0,9880$$

III.7.2. Disponibilité instantané :

$$D(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{1}{13571,1918} = 0,0000736$$

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \Rightarrow \mu = \frac{1}{MTTR} = \frac{1}{164,5} = 0,00607$$

$$\mu + \lambda = 0,0000736 + 0,00607 = 0,006143$$

$$D(t) = \frac{0,00607}{0,006143} + \frac{0,0000736}{0,006143} e^{-(0,006143)t}$$

| T(h) | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| D(t) | 0,884 | 0,782 | 0,691 | 0,611 | 0,541 | 0,471 | 0,423 | 0,374 | 0,331 | 0,301 |

Tableau III.10: Tableau de disponibilité instantané.

III.7.2.1. Courbe de la disponibilité:

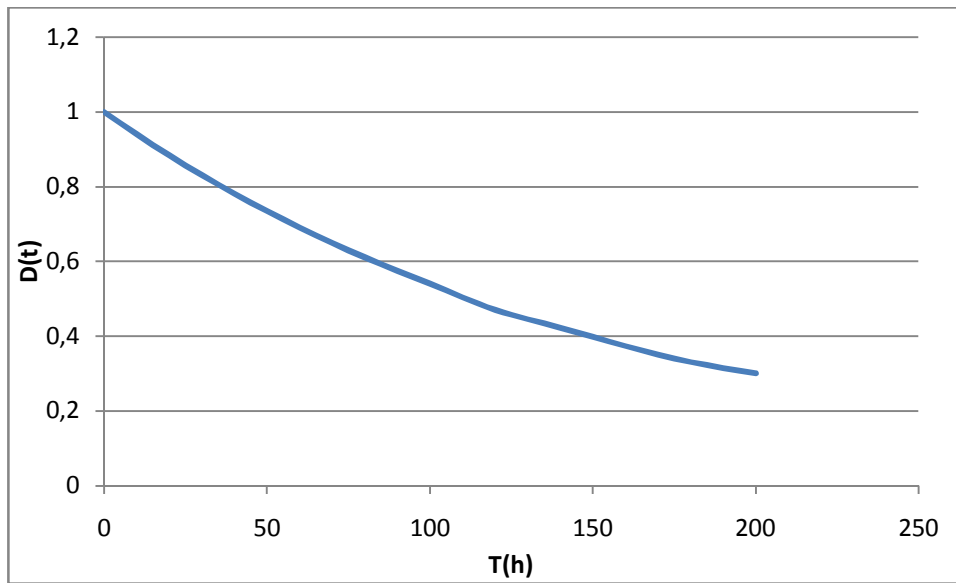


Figure III.8: La Courbe de disponibilité instantanée.

III.7.2.2. Analyse de la courbe :

La disponibilité est décroissante en fonction de temps, pour augmenter la disponibilité d'une turbine consiste à diminuer le nombre de ses arrêts (augmenté sa fiabilité) et réduire le temps nécessaire pour résoudre les causes de ceux-ci (augmenté sa maintenabilité).

Conclusion :

Le Maintien en condition opérationnelle de l'outil de production, joue un rôle clé dans le développement de l'entreprise. Il ne s'agit pas que les activités d'entretien et de réparation d'un équipement, lorsqu'il est en service, c'est beaucoup plus que cette courte vision. Il s'agit en fait de toutes les activités qu'il faut déployer, pendant la totalité du cycle vie de l'équipement, pour garantir à tout moment que le service qu'on attende sera obtenue, et ce ci dans les meilleurs conditions de performance coût/efficacité.

L'orientation actuelle par la méthode dite T.P.M. (Total Productive Maintenance) d'origine Japonaise a pour objectif principal d'améliorer la disponibilité des matériels en responsabilisant tous les acteurs de la production à la maintenance de leur équipement.

Dans ce mémoire nous avons présenté une validation expérimentale des indicateurs FMD en maintenance d'une turbine à gaz type MS5002B. La problématique relative à la prise en compte de la fiabilité, la maintenabilité et de la disponibilité de l'équipement étudiée.

Au cours de notre étude nous avons constaté que l'amélioration FMD de la turbine à gaz joue un grand rôle dans la baisse régulière des dépenses internes et externes de maintenance ramenées au chiffre d'affaires de l'entreprise.

Par ailleurs, prévoir un système de recherche permanente des défaillances imprévues possibles et de leur criticité et faire appel à des techniques prédictives de test et d'inspection qui permet de vérifier l'état de la turbine.

Conclusion générale

Conclusion:

Au terme de notre étude, nous pouvons constater et conclure qu'il est très important de définir la panne et comprendre les phénomènes des défaillances et de dégradation des matériels.

Ainsi de connaître les comportements avec une étude détaillée de la Fiabilité et de la Disponibilité qui permet de choisir une meilleure politique de maintenance, ce qui donne la possibilité de réduire les temps d'arrêts, l'indisponibilité et les coûts de maintenance est tout ça pour concrétiser la meilleure organisation de maintenance.

Dans ce mémoire nous avons présenté une validation expérimentale des indicateurs FMD en maintenance d'une turbine à gaz à deux arbres type MS5002B. La problématique relative à la prise en compte de la fiabilité de la maintenabilité et de la disponibilité de l'équipement étudiée.

Au cours de notre étude nous avons constaté que l'amélioration de la Fiabilité-Maintenabilité- Disponibilité de la turbine à gaz joue un grand rôle dans la baisse régulière des dépenses internes et externes de maintenance ramenées au chiffre d'affaires de l'entreprise.

Bibliographie:

- [1] : HATHAT Abdelkader et DEBLAOUI Hicham «*Etude analytique FMD d'une turbine DR990*» Mémoire master (2015).
- [2] : M. Reggio et J-Y. Trépanier, « *Théorie des turbomachines. RTF* ». Version PDF en français.
- [3] : GE Power System, «*manuel de formation pour la conduite et l'entretien MS 5002 C LHE*», Report for Training Centre of HassiR'Mel, NuovoPignone. Florence, 1987
- [4] : Yves LORANCHET «*Mise en œuvre des turbines à gaz dans l'industrie*»
- [5] : Document de l'entreprise, «*Manuel d'utilisation de la turbine à gaz MS 5002b*»
- [6] : B.S. Dhillon, Ph.D. « *Engineering Maintainability: How to Design for Reliability and Easy Maintenance* » Publisher: Elsevier Science & Technology Books I SBN: 088415257X Pub. Date: 1999
- [7]: Mr-Frédéric tomala« *Cours de maintenance*».
- [8]: Jan Claude Ligeron « *cours de Fiabilité en Mécanique* » M20S/IMdR2009
- [9]: Carroll K.J «*On the use and utility of the Weibull model in the analysis of survival data*», *Controlled Clinical Trials*, vol. 24, 2003,
- [10]: P. Chapouille. « *Fiabilité. Maintenabilité. Techniques de l'ingénieur*» 6 : T4300-T4305, 1980.

Annexe 01 : Tableau de loi Kolmogorov- Smirnov

| N° | Niveau Significatif | | | | |
|-----|---------------------|------------|------------|------------|------------|
| | 0,2 | 0,15 | 0,1 | 0,05 | 0,01 |
| 1 | 0,900 | 0,925 | 0,950 | 0,975 | 0,995 |
| 2 | 0,684 | 0,726 | 0,776 | 0,842 | 0,929 |
| 3 | 0,565 | 0,597 | 0,642 | 0,708 | 0,828 |
| 4 | 0,494 | 0,525 | 0,564 | 0,624 | 0,733 |
| 5 | 0,446 | 0,474 | 0,510 | 0,565 | 0,669 |
| 6 | 0,410 | 0,436 | 0,470 | 0,521 | 0,618 |
| 7 | 0,381 | 0,405 | 0,438 | 0,486 | 0,577 |
| 8 | 0,358 | 0,381 | 0,411 | 0,457 | 0,543 |
| 9 | 0,339 | 0,360 | 0,388 | 0,432 | 0,514 |
| 10 | 0,322 | 0,342 | 0,368 | 0,410 | 0,490 |
| 11 | 0,307 | 0,326 | 0,352 | 0,391 | 0,468 |
| 12 | 0,295 | 0,313 | 0,338 | 0,375 | 0,450 |
| 13 | 0,284 | 0,302 | 0,325 | 0,361 | 0,433 |
| 14 | 0,274 | 0,292 | 0,314 | 0,349 | 0,418 |
| 15 | 0,266 | 0,283 | 0,304 | 0,338 | 0,404 |
| 16 | 0,252 | 0,274 | 0,295 | 0,328 | 0,392 |
| 17 | 0,250 | 0,266 | 0,286 | 0,318 | 0,381 |
| 18 | 0,244 | 0,259 | 0,278 | 0,309 | 0,371 |
| 19 | 0,237 | 0,252 | 0,272 | 0,301 | 0,363 |
| 20 | 0,231 | 0,246 | 0,264 | 0,294 | 0,356 |
| 25 | 0,210 | 0,220 | 0,240 | 0,270 | 0,320 |
| 30 | 0,190 | 0,200 | 0,220 | 0,240 | 0,290 |
| 35 | 0,180 | 0,190 | 0,210 | 0,230 | 0,270 |
| | 1,07 | 1,22 | 0,188 | 1,36 | 1,63 |
| >35 | \sqrt{N} | \sqrt{N} | \sqrt{N} | \sqrt{N} | \sqrt{N} |

Annexe 02 : Distribution de Weibull :

Valeurs des coefficients A et B en fonction du paramètre de forme.

| β | A | B | β | A | B | β | A | B |
|---------|---------|-------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|
| 0,2 | 120 | 1 901 | 1,5 | 0,9027 | 0,613 | 4 | 0,9064 | 0,254 |
| 0,25 | 24 | 199 | 1,55 | 0,8994 | 0,593 | 4,1 | 0,9077 | 0,249 |
| 0,3 | 92,625 | 50,08 | 1,6 | 0,8966 | 0,574 | 4,2 | 0,9086 | 0,244 |
| 0,35 | 5,291 | 19,98 | 1,65 | 0,8942 | 0,556 | 4,3 | 0,9102 | 0,239 |
| 0,4 | 33,234 | 10,44 | 1,7 | 0,8922 | 0,54 | 4,4 | 0,9146 | 0,235 |
| 0,45 | 24,686 | 6,46 | 1,75 | 0,8906 | 0,525 | 4,5 | 0,9125 | 0,23 |
| 0,5 | 2 | 4,47 | 1,8 | 0,8893 | 0,511 | 4,6 | 0,9137 | 0,226 |
| 0,55 | 17,024 | 3,35 | 1,85 | 0,8882 | 0,498 | 4,7 | 0,9149 | 0,222 |
| 0,6 | 1,546 | 2,65 | 1,9 | 0,8874 | 0,486 | 4,8 | 0,916 | 0,218 |
| 0,65 | 13,663 | 2,18 | 1,95 | 0,8867 | 0,474 | 4,9 | 0,9171 | 0,214 |
| 0,7 | 12,638 | 1,85 | 2 | 0,8862 | 0,463 | 5 | 0,9162 | 0,21 |
| 0,75 | 11,906 | 1,61 | 2,1 | 0,8857 | 0,443 | 5,1 | 0,9192 | 0,207 |
| 0,8 | 1,133 | 1,43 | 2,2 | 0,8856 | 0,425 | 5,2 | 0,9202 | 0,203 |
| 0,85 | 1,088 | 1,29 | 2,3 | 0,8859 | 0,409 | 5,3 | 0,9213 | 0,2 |
| 0,9 | 10,522 | 1,17 | 2,4 | 0,8865 | 0,393 | 5,4 | 0,9222 | 0,197 |
| 0,95 | 1,0234 | 1,08 | 2,5 | 0,8873 | 0,38 | 5,5 | 0,9232 | 0,194 |
| 1 | 1 | 1 | 2,6 | 0,8882 | 0,367 | 5,6 | 0,9241 | 0,191 |
| 1,05 | 0,9803 | 0,934 | 2,7 | 0,8893 | 0,355 | 5,7 | 0,9251 | 0,186 |
| 1,1 | 0,9649 | 0,878 | 2,8 | 0,8905 | 0,344 | 5,8 | 0,926 | 0,165 |
| 1,15 | 0,9517 | 0,83 | 2,9 | 0,8919 | 0,334 | 5,9 | 0,9269 | 0,183 |
| 1,2 | 0,9407 | 0,787 | 3 | 0,893 | 0,316 | 6 | 0,9277 | 0,18 |
| 1,25 | 0,99314 | 0,75 | 3,1 | 0,8943 | 0,325 | 6,1 | 0,9266 | 0,177 |
| 1,3 | 0,9236 | 0,716 | 3,2 | 0,8957 | 0,307 | 6,2 | 0,9294 | 0,175 |
| 1,35 | 0,917 | 0,667 | 3,3 | 0,897 | 0,299 | 6,3 | 0,9302 | 0,172 |
| 1,4 | 0,9114 | 0,66 | 3,4 | 0,8984 | 0,292 | 6,4 | 0,931 | 0,17 |
| 1,45 | 0,9067 | 0,635 | 3,5 | 0,8997 | 0,285 | 6,5 | 0,9316 | 0,168 |
| 1,5 | 0,9027 | 0,613 | 3,6 | 0,9011 | 0,278 | 6,6 | 0,9325 | 0,166 |
| 1,55 | 0,8994 | 0,593 | 3,7 | 0,9025 | 0,272 | 6,7 | 0,9335 | 0,163 |
| 1,6 | 0,8966 | 0,574 | 3,8 | 0,9083 | 0,266 | 6,8 | 0,934 | 0,161 |
| 1,65 | 0,8942 | 0,556 | 3,9 | 0,9051 | 0,26 | 6,9 | 0,9347 | 0,15 |

