

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Département d'Électromécanique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle

Estimation de la fiabilité d'une turbine à gaz

Réalisé par :
HADDOUM Idir

Encadré par :
M.BOURAS Rachid

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience nécessaires à mener ce travail à son terme.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon promoteur et à tous mes enseignants.

Je remercie les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger mon travail.

Mes sincères sentiments vont à mes parents qui ont tant sacrifié jusqu'aujourd'hui et leurs encouragements tout le long de mon parcours.

Je remercie également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de mon travail.

Dédicace

“

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents que dieu les protège, pour leur aide et leur soutien tout au long de mes études, à mes frères Amar, Cylia et Masten, à toute ma famille que ce soit du côté paternel ou maternel, mes amis et camarades ainsi à la mémoire de ceux qui nous ont quitté,

*À tous mes enseignants et à toute la promotion 2021/2022,
Enfin à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.*

Merci.

”

- Idir

Résumé

La maintenance des systèmes industriels est devenue un point nécessaire pour la conception et l'exploitation de ces derniers, ainsi elle contribue à leur rentabilité et qualité. Dans notre cas en recherche le type de maintenance approprié avec la rigueur économique qui impose l'optimisation de l'exploitation et de la qualité des produits sur la base de la réduction du ratio services et avec l'évolution très rapide des méthodes et outils liés à la maintenance. Parmi ces outils ou machines liés à la maintenance, on trouve la turbine.

Le but de notre travail est l'étude de la maintenance de la turbine, étude des causes des différents endommagements, ainsi que l'étude de sa fiabilité.

Mots clés : Mécanique, Fiabilité, Turbine à gaz, Maintenance

Table des matières

Remerciements	I
Dédicace	II
Résumé	III
Introduction générale	1
1 Turbines à gaz dans le cadre générale	2
1.1 Introduction	3
1.2 Définition	3
1.3 Historique de la turbine à gaz	4
1.4 Classification des turbines à gaz	4
1.5 Les composants de la turbine à gaz	5
1.6 Différents types de turbine à gaz	5
1.7 Principe de fonctionnement	6
1.8 Domaine d'application d'une turbine à gaz	7
1.8.1 Turbine à gaz d'avion	7
1.8.2 Turbines à gaz pour les véhicules	8
1.8.3 Applications dans la production d'électricité	9
1.8.4 Avantages inconvénients des turbines à gaz	9
1.8.5 Conclusion	10
2 Généralités sur la maintenance	11
2.1 Introduction	12
2.2 Les objectifs de la maintenance	12
2.3 Les différents types de la maintenance	13
2.4 La maintenance préventive systématique	14
2.5 Les niveaux de maintenance	16
2.6 Analyse fonctionnelle	16
2.6.1 Analyse Descendante et liens inter-fonctionnelle)	16
2.7 La Bête à cornes	17
2.7.1 Définition	17
2.7.2 Matière d'œuvre	17
2.7.3 Valeur ajoutée	18
2.8 Le diagramme PARETO	18
2.9 Méthode AMDEC	18
2.9.1 Le mode de défaillance	21

2.9.2	Cause de défaillance	21
2.10	Conclusion	25
3	La fiabilité	26
3.1	Introduction	27
3.2	Définition	27
3.3	Fiabilité et problématique	27
3.3.1	Fonction de fiabilité $R(t)$ – Fonction de défaillance $F(t)$	27
3.4	Indicateurs de fiabilité (λ)et (MTBF) :	30
3.4.1	Temps moyen de bon fonctionnement :	30
3.5	Les différentes phases du cycle de vie d’un produit :	32
3.5.1	Taux de défaillance pour des composants électroniques	33
3.5.2	Taux de défaillance pour des composants mécaniques	34
3.6	Objectifs et intérêts de la fiabilité en mécanique	35
3.7	Evolution des coûts en fonction de la fiabilité	35
3.8	Fiabilité d’un système	36
3.8.1	Fiabilité de système constitué de plusieurs composants	37
3.8.2	Cas des systèmes connectés en parallèle et dis en attente	38
3.9	La relation entre la fiabilité et la maintenance :	39
3.9.1	Principales liaisons fiabilité –maintenance	40
3.9.2	Rôle de La maintenance préventive constituée	41
3.10	Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité :	44
3.10.1	La loi exponentielle	45
3.10.2	La loi normale	46
3.10.3	La loi binomiale	47
3.10.4	Loi de poisson ou la loi de faibles probabilités	48
3.10.5	La loi de Weibull	48
3.11	Fonction de fiabilité $R(t)$	49
3.12	Domaine d’application	51
3.12.1	Papier de Weibull	51
4	Partie pratique : estimation de la fiabilité d’une turbine dr 990	58
4.1	Introduction	59
4.2	Exploitation de l’historique	59
4.3	L’application pratique des méthodes d’analyse	60
4.3.1	Méthodes d’analyse prévisionnelle « ABC (Pareto) »	60
4.3.2	La courbe d’analyse ABC	61
4.3.3	Interpretation des résultats	62
4.4	Calcul des paramètres de weibull	62
4.4.1	Test (KOLMOGOROV SMIRNOV)	63
4.4.2	Exploitation les paramètres de WEIBULL	65
4.5	Étude du modèle de weibull	66
4.5.1	La fonction de la densité de probabilité	66
4.5.2	Fonction de réparation $F(t)$	67
4.6	La fiabilité	68
4.6.1	Courbe de la fiabilité	69

Table des matières

- 4.6.2 Analyse de la courbe de fiabilité 69
- 4.7 Le taux de défaillance 69
 - 4.7.1 Courbe du taux de défaillance 70
 - 4.7.2 Analyse de la courbe du taux de défaillance 70
- 4.8 Conclusion 71

- Conclusion générale 72**

- Bibliographie 75**

Table des figures

1.1	Turbine à gaz	3
1.2	Classification des turbines à gaz	4
1.3	Schéma d'une turbine à un seul arbre	6
1.4	Schéma d'une turbine à un deux arbres	6
1.5	Composants principaux d'un turboréacteur	7
1.6	Dispositif général de la propulsion	7
2.1	Courbes caractéristiques des coûts	15
2.2	S.A.D.T	16
2.3	La Bête à cornes	17
2.4	Décomposition fonctionnelle d'un système	20
2.5	Analyse AMDEC du système	21
2.6	Les différents modes génériques de défaillance	21
2.7	Les différents domaines de causes de défaillances	22
3.1	Fonction de défaillance	28
3.2	Fonctions associées	28
3.3	La courbe en baignoire	33
3.4	Courbe du taux de défaillance en mécanique	35
3.5	Courbes d'évolution des coûts en fonction de la fiabilité	36
3.6	Composants en série	37
3.7	Composants en parallèle	38
3.8	Evolution du taux de défaillance	41
3.9	Effet de la maintenance sur la fiabilité	42
3.10	Distribution des fonctions de la loi exponentielle	46
3.11	Courbes théoriques de Weibull	50
3.12	Papier de Weibull	52
3.13	Papier de Weibull (2)	53
3.14	Recherche de gamma	53
3.15	Recherche de bêta	54
3.16	Fiabilité	55
3.17	Fonction de répartition	55
3.18	Taux de défaillance	56
3.19	Les courbes de $f(t)$	56
4.1	L'analyse « ABC (Pareto) »	61
4.2	La courbe d'ABC	61
4.3	Fonction de repartition réelle	62
4.4	Fonction de repartition réelle	63

Table des figures

4.5	Courbe de la densité de probabilité	67
4.6	Courbe de la fonction de réparation $f(t)$	68
4.7	Courbe de la fonction de la fiabilité	69
4.8	Courbe du taux de défaillance	70

Liste des tableaux

- 2.1 Grille de cotation « Gravité » 23
- 2.2 Grille de cotation « Fréquence » 23
- 2.3 Grille de cotation « Non-détection » 24
- 2.4 Grille AMDEC 24

- 4.1 Dossier historique de la turbine DR990 60
- 4.2 Test de KOLMOGOROV SMIRNOV 64
- 4.3 Calcul de la fonction de la densité de probabilité 66
- 4.4 Fonction de réparation $F(t)$ 67
- 4.5 Calcul de la fiabilité 69
- 4.6 Calcul du taux de défaillance 70

Introduction générale

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

La maintenance des biens de production repose en grande partie sur l'état des mécanismes nécessaires au fonctionnement, personne n'ignore l'importance d'un entretien régulier pour la disponibilité des machines, mais lorsqu'il s'agit d'assurer la sécurité des biens, des personnes et de l'environnement, l'entretien s'avère notoirement insuffisant et nécessite des approches plus fines développées dans les stratégies de maintenance. La maintenance optimale des machines tournantes en fonctionnement a une importance vitale pour assurer une production permanente et augmenter la durée de vie de ces machines.

Le but de ce travail est de connaître des généralités sur les turbines, d'étudier et d'appliquer certaines méthodes de maintenance.

Notre mémoire est structuré en quatre chapitres, suivis d'une conclusion générale.

- Dans le premier chapitre on a présenté la théorie de la turbine en générale.

- Le deuxième chapitre est réservé à l'étude théorique sur l'analyse fonctionnelle et l'AMDEC et quelque diagramme (Pareto, bête à corne) et des généralités sur la maintenance.

- Le troisième chapitre porte sur les différents lois de fiabilité.

- Enfin, le quatrième chapitre expose l'estimation de la fiabilité d'une turbine dr 990

Chapitre 1

Turbines à gaz dans le cadre générale

1.1 Introduction

La turbine est devenue de nos jours très employée dans notre civilisation industrielle, elle trouve trois principaux domaines d'applications : elle est d'abord très répandue dans le domaine de la motorisation, en particulier la motorisation des avions (turboréacteur) ; elle est également utilisée dans la production d'électricité (centrales électriques) ; et elle joue le rôle primordiale dans l'exploitation de pétrole et de gaz naturel. Dans ce chapitre, on va présenter les différents types des turbines, leur principe de fonctionnement, leurs avantages et leurs inconvénients, leurs fonctionnement, et aux différents composants qui les constituent.

1.2 Définition

Une turbine à gaz , appelée aussi turbine à combustion ou parfois turbine à gaz de combustion , est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique sous la forme de la rotation d'un arbre, directement à partir de l'énergie cinétique des gaz produits par la combustion d'un hydrocarbure (fuel, gaz combustible...) qui subissent une détente dans une turbine. Le comburant, le plus souvent de l'air ambiant, est généralement comprimé avant de pénétrer dans la chambre de combustion, en utilisant un compresseur rotatif entraîné par le même arbre que la turbine. Le mot « gaz » dans l'ancienne dénomination « turbine à gaz » (longtemps la plus employée) fait référence au caractère gazeux des produits de combustion, par opposition aux turbines à vapeur dans lesquelles le fluide moteur (de la vapeur d'eau) se condense en liquide. Le turboréacteur est une turbine à gaz particulière qui utilise le principe de la réaction pour propulser certains types d'avions rapides.

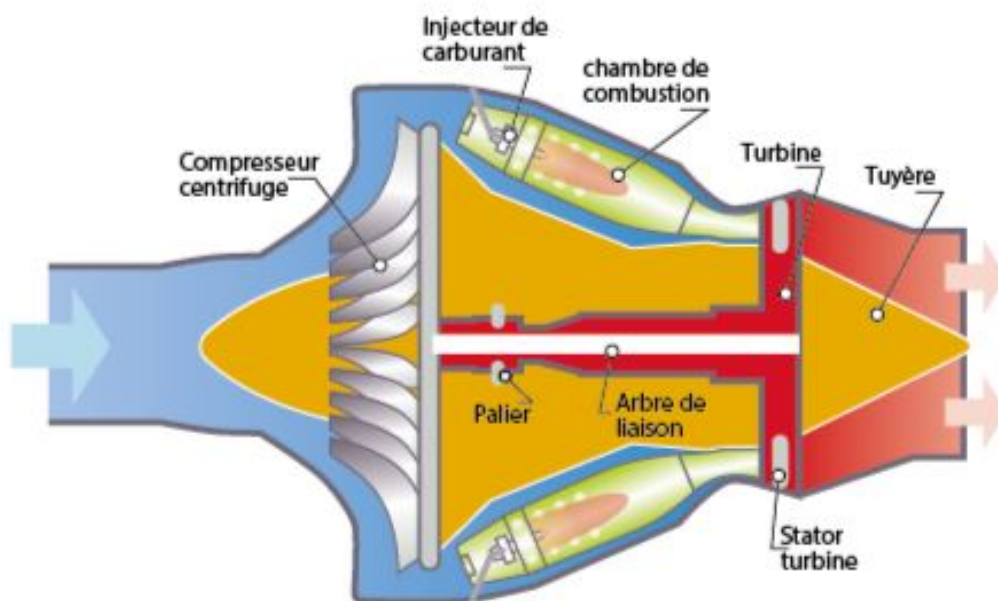


FIG. 1.1 : Turbine à gaz

1.3 Historique de la turbine à gaz

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

1.4 Classification des turbines à gaz

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 :

- 1 ère génération : $760 < T_{max} < 850$ °C
- 2 ème génération : $955 < T_{max} < 1124$ °C
- 3 ème génération : $1149 < T_{max} < 1288$ °C

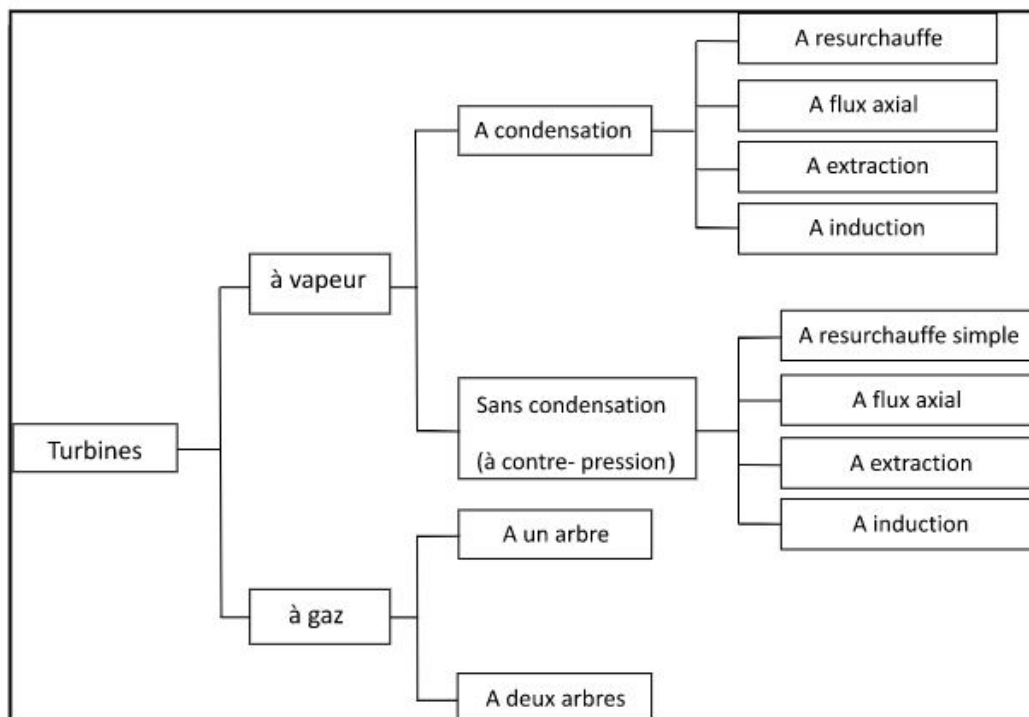


FIG. 1.2 : Classification des turbines à gaz

1.5 Les composants de la turbine à gaz

a- Compresseur :

Le rôle du compresseur est d'augmenter la pression d'air pour que les processus de combustion et d'extraction de puissance puissent être effectués de façon plus efficace. Plus la pression de l'air augmente et plus son volume diminue, ce qui signifie que la combustion de la combinaison carburant/air s'opère en petite quantité.

b- Chambre de combustion

La chambre de combustion est conçue pour brûler le mélange (air/carburant) et fournir les gaz à la turbine à une température stable. La température de gaz ne doit pas dépasser la température structurelle tolérée à la turbine. Environ la moitié du volume d'air entrant dans le brûleur est consommée en se mélangeant à du carburant. La quantité d'air restante est utilisée pour le refroidissement des produits du combustion et les surfaces du brûleur.

c- Turbine

La turbine est un ensemble de palettes concentriques avec l'axe de la turbine placées sous un angle pour former une série becs qui déversent les gaz sur les lames de la roue de la turbine. Comme le compresseur axial, la turbine axiale est formée de plusieurs étages, mais en nombre inférieur par rapport au compresseur parce que la pression est décroissante (processus de détente) alors que dans le compresseur, la pression augmente (processus de compression).

1.6 Différents types de turbine à gaz

Une turbine à gaz peut comporter une ou deux lignes d'arbre pour l'ensemble des éléments tournants :

a- Turbine à une ligne d'arbre

Le système est entraîné d'abord par un moteur jusqu'à une certaine vitesse, ensuite c'est la turbine HP qui continue l'entraînement de l'ensemble des éléments.

b- Turbine à deux lignes d'arbre

Comme pour une ligne d'arbre, il est rajouté une turbine BP en bout d'arbre séparé mécaniquement. La conception à deux lignes d'arbres représente le maximum de souplesse et, est retenue pour les applications de grandes puissances.

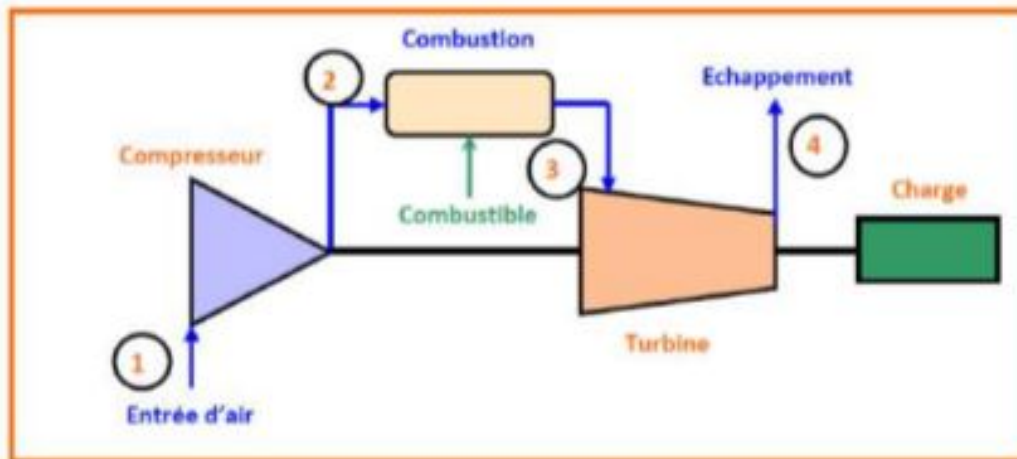


FIG. 1.3 : Schéma d'une turbine à un seul arbre

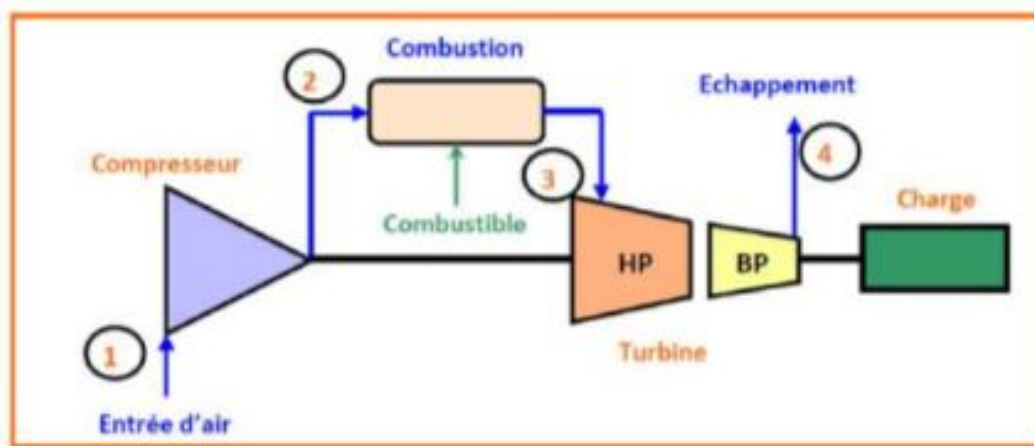


FIG. 1.4 : Schéma d'une turbine à un deux arbres

1.7 Principe de fonctionnement

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

1.8 Domaine d'application d'une turbine à gaz

1.8.1 Turbine à gaz d'avion

Dans les moteurs d'avion, l'unité de turbine à gaz fonctionne entièrement comme générateur de gaz dans le turbo-jet et les moteurs de turboréacteur, tandis qu'elle fournit la puissance d'exigée d'axe au propulseur dans le moteur de turbopropulseur . La centrale de turbine à gaz utilisée pour la propulsion d'avion travaille sur le cycle de circuit ouvert de pression constante. L'air entre dans le moteur à travers le diffuseur d'admission, une partie de la compression se produit dans le diffuseur et le reste dans le compresseur. L'air à haute pression du compresseur pénètre dans la chambre de combustion (ou des chambres) en tant qu'air primaire, secondaire et tertiaire. Les gaz chauds sortant de la chambre de combustion traversent l'étage de turbine (ou des étages) qui conduit le compresseur et le propulseur (s'il existe). Une partie de la détente des gaz se produit également dans la tuyère . Le choix d'un type particulier de dispositif de propulsion (moteur) dépend du type d'avion, son gamma, sa vitesse de croisière et l'altitude.

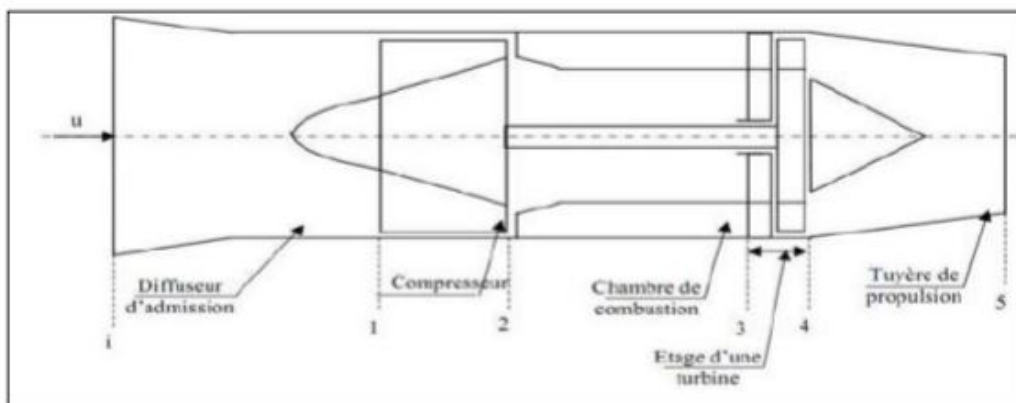


FIG. 1.5 : Composants principaux d'un turboréacteur

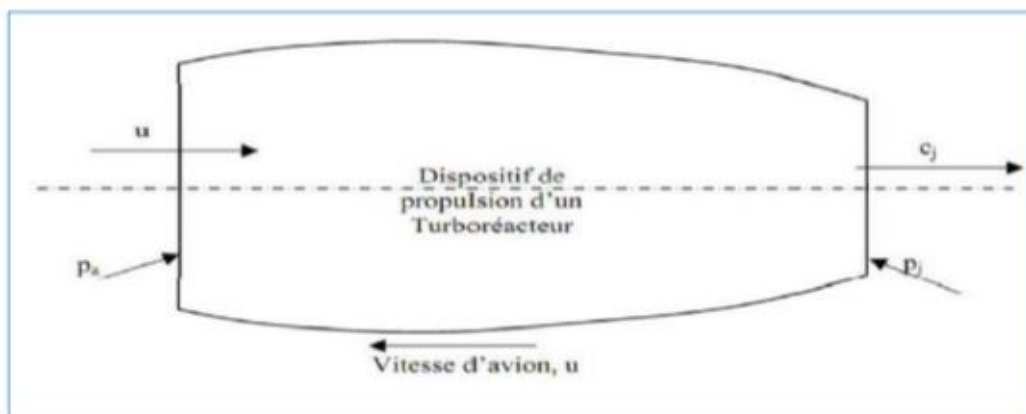


FIG. 1.6 : Dispositif général de la propulsion

1.8.2 Turbines à gaz pour les véhicules

Les problèmes et les caractéristiques de conception des turbines à gaz utilisées par les véhicules extérieurs sont considérablement différents de ceux des turbines à gaz d'avion.

1.8.2.1 Automobiles

Des tentatives ont été faites par un certain nombre de compagnies de fabrication d'automobile dans plusieurs pays afin de perfectionner des turbomoteurs pour des voitures. Un échangeur de chaleur d'échappement a été employé pour une consommation optimale du carburant. Un certain degré de succès a été réalisé dans le domaine des véhicules avec des moteurs de plus de 200 kilowatts. Beaucoup de concepteurs ont utilisé la combinaison d'une turbine axiale et d'un compresseur centrifuge de basse pression avec un échangeur de chaleur rotatif. Malgré leur faible encombrement, leur faible poids pour une puissance donnée et leurs faibles émissions d'échappement par rapport aux moteurs à essence. Les inconvénients des couts de fabrication élevés du faible rendement thermique et des faibles performances en charge partielle et en ralenti ont prouvé leur efficacité peu économique et peu pratique.

1.8.2.2 Locomotives ferroviaires

Entre les années cinquante et soixante, les constructeurs de locomotives ont construit un certain nombre de véhicules équipés de moteurs à turbine à gaz qui utilisent du pétrole lourd. Bien que, les locomotives à turbines à gaz qui ont connus un succès modéré au cours de longues trajets, elles n'ont pas été en mesure de percer de manière significative contre les locomotives diesels . Dans de la condition de fonctionnement normal, en particulier après l'augmentation du cout relatif du mazout lourd.

1.8.2.3 Suralimentation par les gaz d'échappement

De petites turbines à gaz sont également utilisées dans des automobiles pour la suralimentation, tous les grands camions et locomotives à moteur diesel ferroviaire sont suralimentés. Ils utilisent des turbines entraînées par les gaz d'échappement pour l'entraînement des compresseurs d'air.

1.8.2.4 Propulsion Marine

Dans ce domaine d'application, le moteur à turbine à gaz présente deux avantages par rapport aux centrales à vapeur et au diesel, il est léger et compact. Aujourd'hui, énormément de navires de guerre utilisent la turbine à gaz au profit du moteur diesel. La consommation en carburant est bien plus importante, certes, mais le rapport poids /puissance est bien meilleur.

1.8.3 Applications dans la production d'électricité

La première turbine à gaz pour l'application dans la production du courant électrique a été présentée par Brown Boveri (Suisse en 1937). Aujourd'hui, la turbine à gaz joue un rôle important sur le marché de la production d'électricité. Cette application est extrêmement courante : l'arbre de la turbine entraîne un réducteur, dont l'arbre à petite vitesse, entraîne un alternateur. Le système mécanique est simple et peut être comparé à un groupe turboalternateurs à vapeur. Produire uniquement de l'électricité avec une turbine à gaz n'est intéressant que pour des conditions d'exploitation imposant ce système. L'installation d'une centrale de turbine à gaz pour produire elle-même de l'électricité n'est à envisager que si l'on récupère l'énergie contenue dans les gaz d'échappement afin d'obtenir un rendement global élevé et, par conséquent, une rentabilité maximale.

1.8.4 Avantages inconvénients des turbines à gaz

Les applications des turbines à gaz sont très variées et leur fonctionnement n'exige qu'une alimentation en combustible et des systèmes de démarrage et d'échappement.

Avantages

Par rapport les moteurs à pistons :

- Suppression des pièces à mouvements alternatifs.
- Détente plus complète des gaz brûlés.
- Suppression des pièces frottantes (graissage moins onéreux)
- Rendement de l'ordre de 25%.

Par rapport aux turbines à vapeur :

- Frais de première installation bas, pas de chaudière ni de condenseur
- Amélioration du rendement et suppression du fluide intermédiaire.
- Mise en marche rapide.

1.8.4.1 Inconvénients

- Difficulté d'obtenir des matériaux résistants aux hautes températures.
- Nécessité d'un compresseur et d'une pompe à combustible (ou d'un compresseur de gaz).

1.8.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une panoplie d'informations relatives à la turbine à gaz avec une liste détaillée concernant ses éléments et ses applications dans le domaine énergétique. Nous avons de même mise en évidence les différentes évolutions de cette machine.

Chapitre 2

Généralités sur la maintenance

2.1 Introduction

En industrie, la Maintenance est l'une des fonctions essentielles du système de production comme elle est une fonction capitale dans les systèmes fortement automatisés.

La notion de maintenance est définie par la norme NF 60 010 : « C'est l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. »

Parfois, la Maintenance constitue un élément stratégique de l'entreprise qui nécessite des moyens importants et beaucoup de dépenses. Une Maintenance mal organisée, mal gérée ou mal exécutée, peut avoir des impacts néfastes sur le fonctionnement du système de production :

- Arrêts multiples et indisponibilité des installations,
- Surcoûts de production,
- Grands risques de mauvaise qualité et d'indisponibilité des produits

De même, une mauvaise Maintenance ou une Maintenance insuffisante, peut être parfois à l'origine d'importantes catastrophes (aéronautique, transport, nucléaire, ...) et peut mettre en danger l'existence même de l'entreprise.

2.2 Les objectifs de la maintenance

D'une manière générale, la maintenance a pour but d'assurer la disponibilité maximale des équipements de production à un coût optimal.

Les principaux objectifs que doit se fixer la fonction maintenance sont :

Améliorer la fiabilité du matériel

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

Garantir la qualité des produits

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

Améliorer l'ordonnancement des travaux

La planification des interventions de la maintenance préventive, correspondant au planning d'arrêt machine, devra être validée par le service production. Cela implique la

collaboration de ce service, afin de faciliter la tâche de la maintenance. Les techniciens de maintenance sont souvent mécontents lorsque le responsable de production ne permet pas l'arrêt de l'installation, alors qu'il a reçu un bon de travail pour l'intervention. Une bonne coordination prévoit un arrêt selon un planning défini à l'avance prenant en compte les impossibilités en fonction des impératifs de production.

Assurer les sécurités humaines

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

Améliorer la gestion de stock

Elle maîtrise les échéances de remplacement des organes ou pièces, ce qui facilite la tâche de gestion des stocks. Elle permet aussi d'éviter de mettre en stock certaines pièces et ne les commander que le moment venu.

2.3 Les différents types de la maintenance

Il existe deux façons complémentaires d'organiser les actions de maintenance :

Maintenance corrective

Consiste à intervenir sur un équipement une fois que celui-ci est défaillant. Elle se subdivise en :

Maintenance palliative

Dépannage (donc provisoire) de l'équipement, permettant à celui-ci d'assurer tout ou partie d'une fonction requise ; elle doit toutefois être suivie d'une action curative dans les plus brefs délais.

Maintenance curative

Réparation (donc durable) consistant en une remise en l'état initial.

Maintenance préventive

Consiste à intervenir sur un équipement avant que celui-ci ne soit défaillant, afin de tenter de prévenir la panne. on interviendra de manière préventive soit pour des raisons de sûreté de fonctionnement (les conséquences d'une défaillance sont inacceptables) soit pour

des raisons économiques (cela revient moins cher) ou parfois pratiques (l'équipement n'est disponible pour la maintenance qu'à certains moments précis). La maintenance préventive se subdivise à son tour en :

Maintenance systématique

Désigne des opérations effectuées systématiquement, soit selon un calendrier (à périodicité temporelle fixe), soit selon une périodicité d'usage (heures de fonctionnement, nombre d'unités produites, nombre de mouvements effectués, etc.).

Maintenance conditionnelle

Réalisée à la suite de relevés, de mesures, de contrôles révélateurs de l'état de dégradation de l'équipement.

2.4 La maintenance préventive systématique

La maintenance préventive est effectuée selon des critères prédéterminés dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien. On distingue deux cas de maintenance préventive, celle systématique et celle conditionnelle.

En maintenance systématique, la visite des équipements est dictée par des données statistiques à intervalles réguliers et fixes. Les éléments constitutifs des équipements étant renouvelés avant l'épuisement total de leur vie utile. L'intervention est provoquée avant l'avarie. Ces intervalles sont souvent déterminés statistiquement comme étant la période (à partir de l'état neuf ou rénové) à la fin de laquelle le taux de pannes cumulées n'excède pas les 2,5. Là on est conduit à changer ou à réparer des pièces qui auraient très bien pu fonctionner encore pendant un certain temps. Dans une politique prévisionnelle bien adaptée, l'on ne subit pas la panne car elle est prévue, et le budget est donc la conséquence de prévisions calculées et prévues.

Le contrôle budgétaire reste un contrôle normal. Une fois que les choix sont faits au départ, donc rentabilisés, toute économie devient une dépense ou correspond à une mauvaise prévision. Cependant ce type de maintenance est déjà mieux adapté pour les équipements vitaux de production que celle curative. Néanmoins le seuil de sécurité exigé est un seuil en dessous duquel on ne désire pas descendre et la multiplication intolérable des indisponibilités .

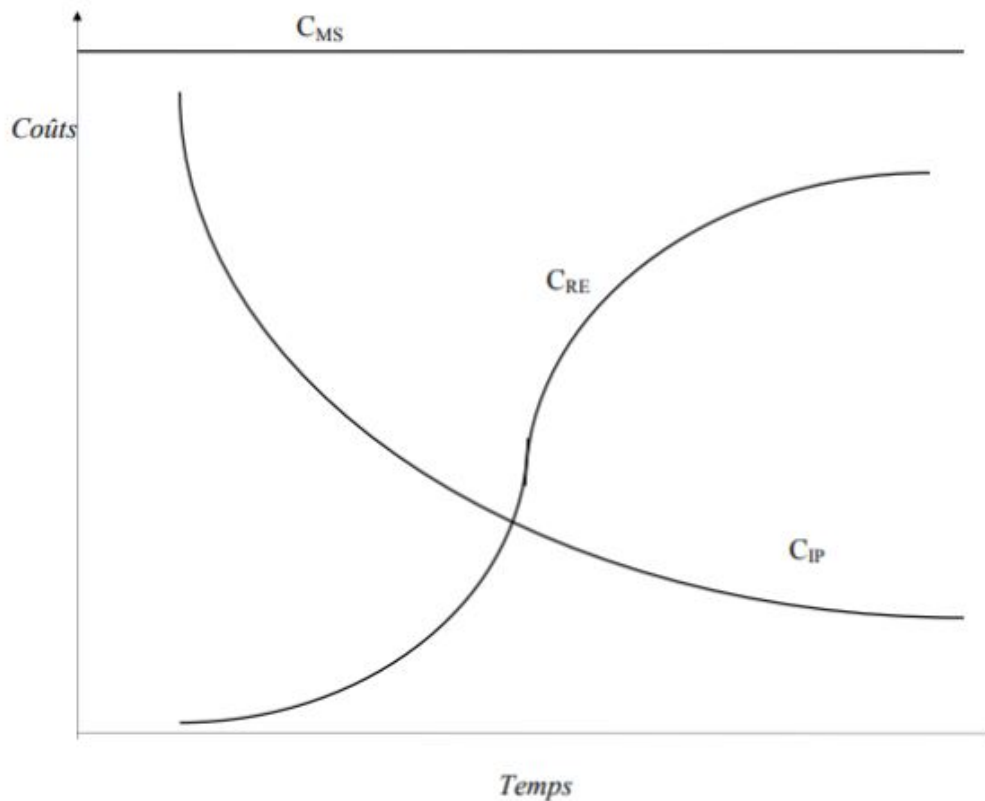


FIG. 2.1 : Courbes caractéristiques des coûts

CMS : Coût de Maintenance Systématique

CIP : Coût Intrinsèque de la Prévention

CRE : Coût des Réparations Évitées

$$CIP = CMS - CRE$$

Le tribut à payer pour assurer la disponibilité de l'outil de production diminue avec le temps lorsqu'on lui soustrait le coût des réparations évitées.

Avantages :

- Le coût de chaque opération est prédéterminé et la gestion financière du service en est facilitée
- Les opérations et les arrêts sont programmés en accord avec la production

Inconvénients :

- Le coût des opérations est élevé car la périodicité est calée sur la durée de vie d'un composant
- L'intervention est anticipée pour rester en phase avec d'autres arrêts
- Le démontage même partiel d'un appareil incite aux changements de pièces par précaution.
- La multitude des opérations de démontage accroît le risque d'introduction de nouvelles pannes dites "de jeunesse" ou "de rodage". La fiabilité des machines après remontage se trouve réduite ou fragilisée du fait d'erreurs humaines.

2.5 Les niveaux de maintenance

- **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.

2.6 Analyse fonctionnelle

2.6.1 Analyse Descendante et liens inter-fonctionnelle)

Il s'agit d'une technique structurée d'analyse et de modélisation des systèmes (Structured Analysis Design Technic). Une fonction est représentée par une « boîte » ou « module » SADT. Une boîte SADT est située dans son contexte avec les autres boîtes ou modules, par l'intermédiaire de flèches de relation. Ces flèches symbolisent les contraintes de liaisons entre boîtes. Elles ne font pas office de commande ou de séquence ment au sens strict.

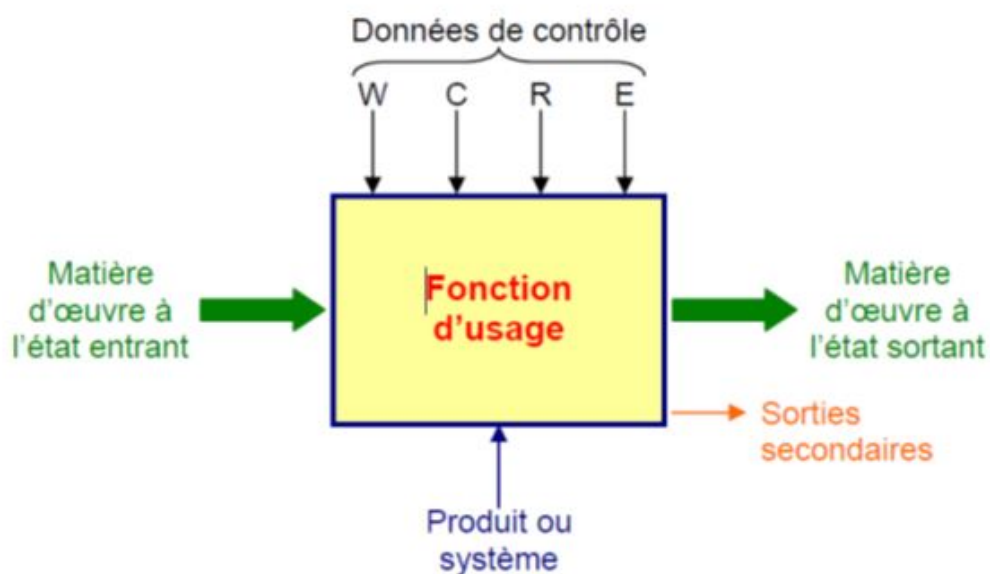


FIG. 2.2 : S.A.D.T

2.7 La Bête à cornes

2.7.1 Définition

La bête à cornes est un outil graphique d'analyse du besoin qui permet de répondre à trois questions :

- 1/ A qui ou quoi le produit rend-il service ?
- 2/ Sur qui ou quoi agit-il ?
- 3/ Dans quel but ?

Le but est toujours formulé de la même façon : le produit permet à l'utilisateur d'agir sur la matière d'œuvre. Les réponses à ces questions sont regroupées dans le graphe des prestations appelé aussi « bête à cornes ».

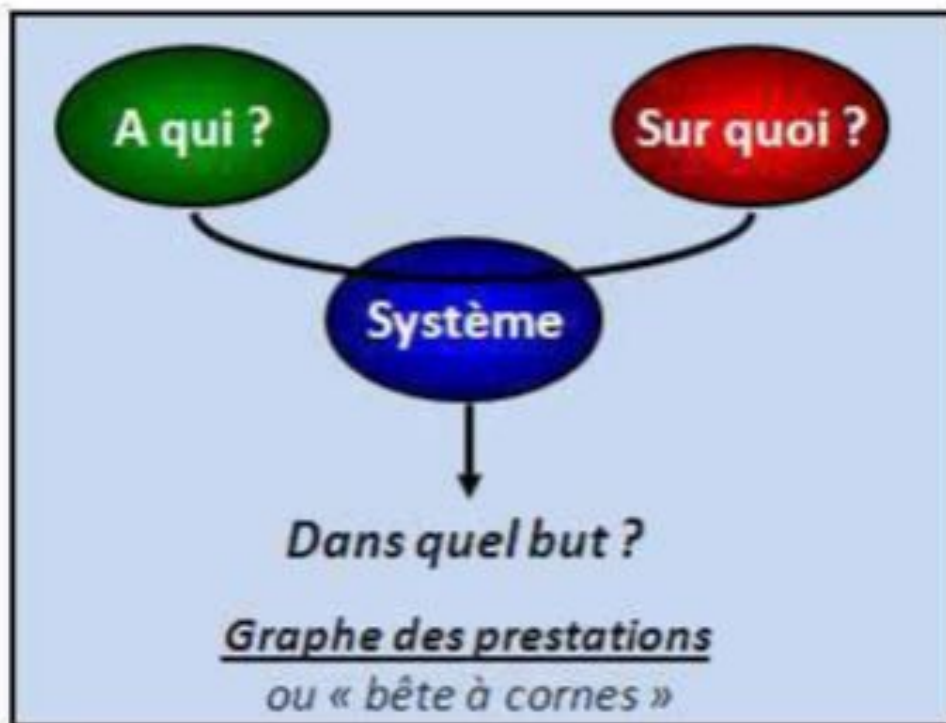


FIG. 2.3 : La Bête à cornes

2.7.2 Matière d'œuvre

On appelle matière d'œuvre la matière, l'énergie et/ou l'information sur le(s)quelle(s) agit le système.

Cette intervention peut se traduire par une ou plusieurs actions :

- Une modification de forme, de structure, ...
- Un déplacement
- Un stockage.

2.7.3 Valeur ajoutée

La valeur ajoutée est définie comme la modification apportée à la matière d'œuvre entre l'entrée et la sortie du système.

2.8 Le diagramme PARETO

Définition

Le diagramme de Pareto est un graphique représentant l'importance de différentes causes sur un phénomène. Ce diagramme permet de mettre en évidence les causes les plus importantes sur le nombre total d'effet et ainsi de prendre des mesures ciblées pour améliorer une situation.

Principe

Ce diagramme représente une série de colonnes triées par ordre décroissant. Elles sont généralement accompagnées d'une courbe des valeurs cumulées de toutes les colonnes. Ce diagramme est construit en plusieurs étapes :

- Etablir la liste des données.
- Quantifier chacune de ces données.
- Effectuer la somme des valeurs obtenues.
- Calculer les pourcentages par valeurs décroissantes.
- Représenter graphiquement ces pourcentages par un histogramme.
- Représenter l'histogramme des valeurs cumulées.

2.9 Méthode AMDEC

Définition

Que l'on soit créateur ou exploitant d'une machine, l'on s'interroge sur sa fiabilité. Quelles sont les problèmes auxquels on doit s'attendre de la part de cette machine ?

La réponse à cette question passe par la mise en œuvre de méthodes de maintenance. L'une de ces méthodes – l'AMDEC - est parfaitement justifiée lorsqu'aucun historique concernant l'installation n'est disponible (en particulier pour les machines neuves ou de conception récente).

L'association française de normalisation (AFNOR) définit l'AMDEC comme étant „ une méthode inductive qui permet de réaliser une analyse qualitative et quantitative de la fiabilité ou de la sécurité d'un système. La méthode consiste à examiner méthodiquement les défaillances potentielles des systèmes (Analyse des modes de défaillance), leurs causes et leurs conséquences sur le fonctionnement de l'ensemble (les effets). Après une

hiérarchisation des défaillances potentielles, basée sur l'estimation du niveau de risque de défaillance, selon la criticité, des actions prioritaires sont déclenchées et suivies.

Le but de l'AMDEC

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité La méthode AMDEC a pour objectif :

- D'identifier les causes et les effets de l'échec potentiel d'un procédé ou d'un moyen de production.
- D'identifier les actions pouvant éliminer (ou du moins réduire) l'échec potentiel.

Définitions des différents types d'AMDEC

- Produit : Analyse de la Conception d'un produit pour améliorer sa QUALITE et sa FIABILITE.
- Moyen de production (ou système) : Analyse de la Conception et /ou de l'Exploitation des Équipements de Production pour améliorer leur DISPONIBILITE.
- Processus : Analyse des opérations de Production pour améliorer la QUALITE de FABRICATION du produit.
- Sécurité : Analyse des défaillances et des risques prévisionnels sur un équipement pour améliorer la SECURITE et la FIABILITE.

Choix du type d'AMDEC

L'étude AMDEC permet de prévoir les causes des pannes. Dans le cadre de ce projet le type d'AMDEC choisi est l'AMDEC moyen.

AMDEC moyen

on identifie les défaillances du moyen de production dont les effets agissent directement sur la productivité de l'entreprise. Il s'agit donc de l'analyse des pannes et de l'optimisation de la maintenance.

L'AMDEC étant une méthode prédictive, elle repose fortement sur l'expérience. Il est donc nécessaire de faire appel à des expériences d'horizon divers afin de neutraliser l'aspect subjectif des analyses. Après avoir constitué un groupe de travail, on passe à l'analyse fonctionnelle :

Le système dont on étudie les défaillances doit d'abord être "décortiqué". A quoi sert-il ? Quelles fonctions doit-il remplir ? Comment fonctionne-t-il ? L'analyse fonctionnelle doit répondre à ces questions, de façon rigoureuse.

Le système est analysé sous ses aspects :

- Externes : relations avec le milieu extérieur (qu'est ce qui rentre, qu'est ce qui sort, ...)
- Internes : analyse des flux et des activités au sein du procédé ou de la machine

Décomposition fonctionnelle du système étudié

Pour une AMDEC moyen de production : découpage arborescent du système en plusieurs niveaux dont le niveau le plus bas représente les éléments.

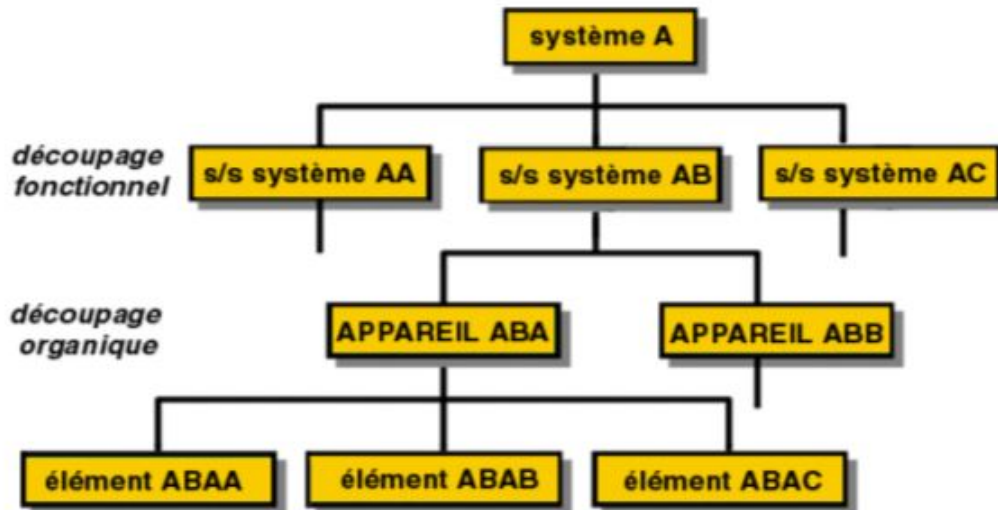


FIG. 2.4 : Décomposition fonctionnelle d'un système

Analyse AMDEC du système

A partir de l'analyse fonctionnelle, la démarche consiste à effectuer les phases suivantes :

- Analyse des mécanismes de défaillances.
- Evaluation de la CRITICITE.
- Proposition d ACTIONS CORRECTIVES (réduction des effets par la maintenance préventive, détection préventive, maintenance améliorative, calcul de la nouvelle criticité après action).

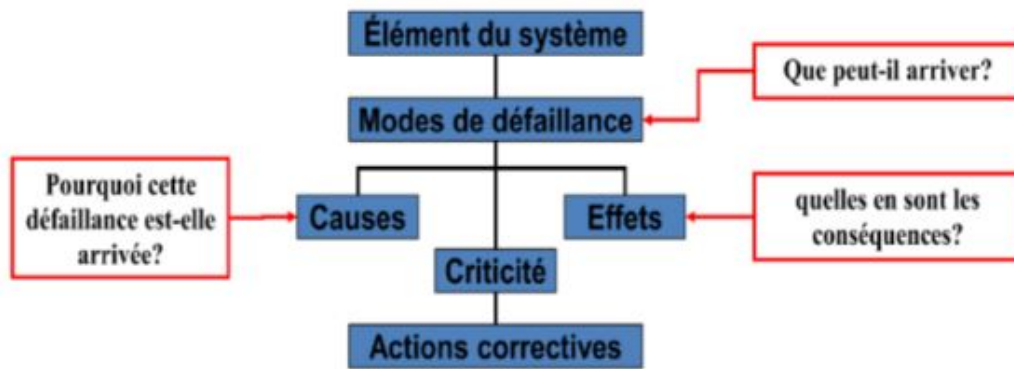


FIG. 2.5 : Analyse AMDEC du système

2.9.1 Le mode de défaillance

Il concerne la fonction et exprime de quelle manière cette fonction ne fait plus ce qu'elle est sensée faire. L'analyse fonctionnelle recense les fonctions, l'AMDEC envisage pour chacune d'entre-elles sa façon (ou ses façons car il peut y en avoir plusieurs) de ne plus se comporter correctement. On distingue 5 modes génériques de défaillance :

- Perte de la fonction.
- Fonctionnement intempestif.
- Démarrage impossible.
- Refus de s'arrêter.
- Fonctionnement dégradé.

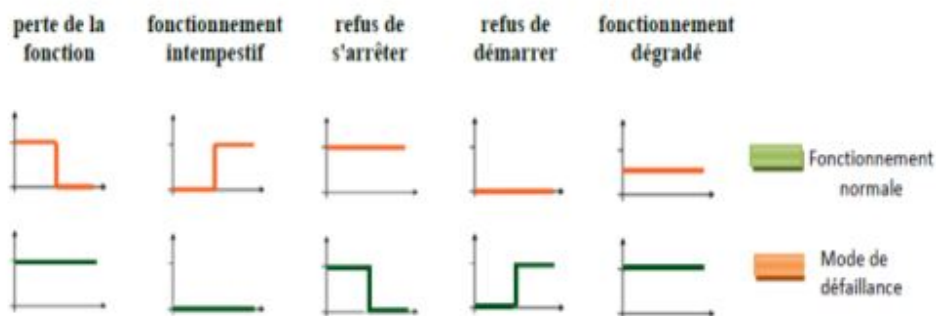


FIG. 2.6 : Les différents modes génériques de défaillance

2.9.2 Cause de défaillance

La cause de la défaillance est une anomalie initiale susceptible de conduire au mode de défaillance. Elle s'exprime en termes d'écart par rapport à la norme. Elle se répartit dans les domaines suivants (par exemple) : - Les hommes : Manque de formation, des techniciens non-diplomés.

- Le milieu : l'influence du milieu sur les machines par exemple le changement de température de milieu provoque un changement de température dans le four.
- La documentation : Manque des manuels de constructeur des machines.
- L'organisation : Manque d'organisation au sein de service maintenance.

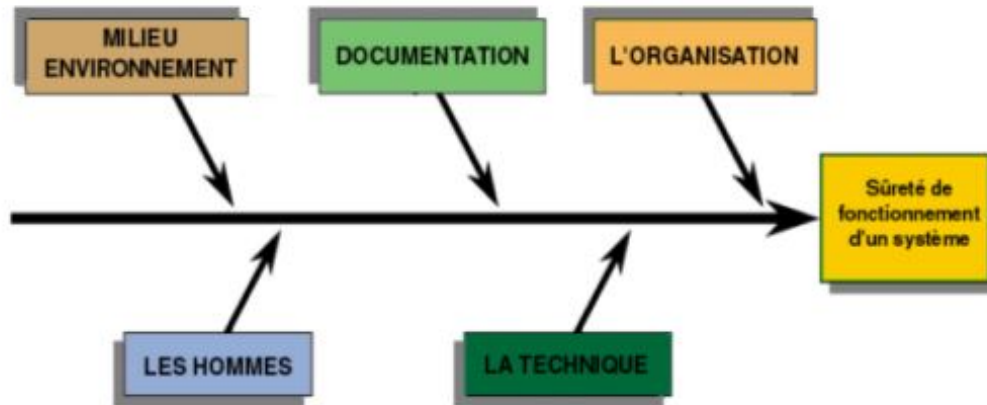


FIG. 2.7 : Les différents domaines de causes de défaillances

- Effet de la défaillance : cet effet concrétise la conséquence d'une défaillance. Il est relatif à un mode de défaillance et dépend du type d'AMDEC réalisé. L'évaluation de la criticité de chaque combinaison cause, mode, effet se fait par des critères de cotation :

- La fréquence d'apparition de la défaillance.
- La gravité de la défaillance.
- La probabilité de non-détection de la défaillance.

La valeur de la criticité est calculée par le produit des niveaux atteints par les critères de cotation.

- Gravité G :

Niveau	Valeur	Définition
mineure	1	-arrêt de production : moins de 15 minutes -aucune ou peu pièce de rechange nécessaire
moyenne	2	-arrêt de production : de 15 minutes à une heure -pièces en stock
majeure	3	-arrêt de production : 1 heure à 2 heures -pièces en stock ou livraison ultra-rapide
grave	4	-arrêt de production : 2 heures et plus -long délai de livraison ou back-order

TAB. 2.1 : Grille de cotation « Gravité »

- Fréquence :

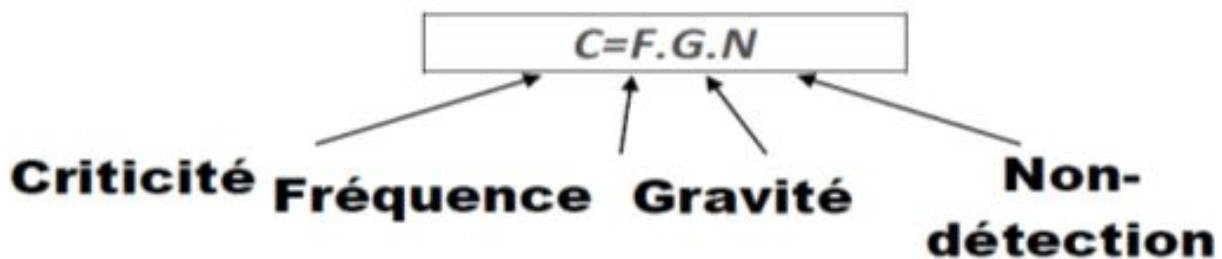
niveau	Valeur	Définition
Très faible	1	défaillance rare : moins de une défaillance par année
Faible	2	défaillance possible : moins de une défaillance par trimestre
moyen	3	défaillance occasionnelle : moins de une défaillance par semaine
Elevé	4	défaillance fréquente : plus d'une défaillance par semaine

TAB. 2.2 : Grille de cotation « Fréquence »

- Détection :

niveau	Valeur	Définition
évident	1	détection certaine, sirène, moyens automatiques, signes évidents
possible	2	délectable par l'opérateur, par des routes d'inspections, vibrations
improbable	3	difficilement détectable, moyens complexes (démontages, appareils)
impossible	4	indétectable, aucun signe

TAB. 2.3 : Grille de cotation « Non-détection »



La grille AMDEC

La grille AMDEC typique comprend 7 colonnes :

- Nom de l'élément.
- Fonction.
- Mode de défaillance.
- Effets.
- Causes.
- Cotation de la criticité.
- Action corrective.

Cette grille peut aussi contenir d'autres colonnes pour le suivi des actions et la réévaluation de la criticité

Elément	Fonction	Mode	Effet	Causes	criticité	Actions correctives

TAB. 2.4 : Grille AMDEC

Les actions :

- la finalité de l'analyse AMDEC, après la mise en évidence des défaillances critiques, est de définir des actions de nature à traiter le problème identifié. Les actions sont de 3 types :
- Actions préventives : on agit pour prévenir la défaillance avant qu'elle ne se produise, pour l'empêcher de se produire. Ces actions sont planifiées. La période d'application d'une action résulte de l'évaluation de la fréquence.
- Actions correctives : lorsque le problème n'est pas considéré comme critique, on agit au moment où il se présente. L'action doit alors être la plus courte possible pour une remise aux normes rapide.
- Actions amélioratives : il s'agit en général de modifications de procédé ou de modifications technologiques du moyen de production destinées à faire disparaître totalement le problème. Le coût de ce type d'action n'est pas négligeable et on le traite comme un investissement.

Les actions, pour être efficaces, doivent faire l'objet d'un suivi :

- Plan d'action
- Désignation d'un responsable de l'action
- Détermination d'un délai
- Détermination d'un budget

2.10 Conclusion

La maintenance en tant que technologie mal menée gagne de jour en jour ses titres de noblesse et devient une fonction clef de l'entreprise. Par son effet, elle agit comme facteur de productivité, élément de sécurité, argument de promotion et réputation de la classe de l'entreprise. L'exploitant pour la majorité de son parc de machines, a malheureusement peu d'impact sur la faisabilité et la maintenabilité. Il peut par contre s'organiser pour améliorer sa maintenance. La maintenance corrective n'est sûrement pas la meilleure méthode pour éviter la panne. La maintenance systématique, faite à intervalles réguliers diminue les risques mais est d'un coût excessif c'est pourquoi le remplacement systématique du matériel doit disparaître progressivement sauf pour du petit matériel peu coûteux et non stratégique pour la production.

Cependant l'auscultation périodique par démontage et remontage partiel ou complet doit céder la place par des mesures de paramètres et leurs traitements, à des méthodes de maintenance conditionnelle.

Chapitre 3

La fiabilité

3.1 Introduction

3.2 Définition

La fiabilité caractérise l'aptitude d'un système ou d'un matériel à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un intervalle de temps donné.

3.3 Fiabilité et problématique

La fiabilité a sans doute pris son développement depuis la dernière guerre mondiale. Elle est vite devenue une science à part entière dans les applications appartenant à de nombreux domaines. Elle a pour fondements mathématiques la statistique et le calcul des probabilités qui sont nécessaires à la compréhension et à l'analyse des données de fiabilité. La défaillance (la non fiabilité) augmente les coûts d'après-vente (application des garanties, frais judiciaires,...etc.). Construire plus fiable augmente les coûts de conception et de production, en pratique, le coût total d'un produit prend en compte ces deux tendances.

3.3.1 Fonction de fiabilité $R(t)$ – Fonction de défaillance $F(t)$

Considérons un matériel dont on étudie la fiabilité. Soit Z la variable aléatoire qui à chaque matériel associe son temps de bon fonctionnement. On choisit un de ces matériels au hasard. Soit les événements A : « Le matériel est en état de bon fonctionnement à l'instant t » et B : « Le matériel est défaillant à l'instant $t + \Delta t$ », on a alors :

$$p(A) = p(T > t) \quad \text{et} \quad p(B) = p(T \leq t + \Delta t)$$

$$\begin{aligned} \text{Donc} \quad p(A \cap B) &= p(t < T < t + \Delta t) \\ &= F(t + \Delta t) - F(t) \\ &= (1 - R(t + \Delta t)) - (1 - R(t)) \\ &= R(t) - R(t + \Delta t) \end{aligned}$$

$$\text{On en déduit que} \quad p(B/A) = \frac{p(A \cap B)}{p(A)} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)}$$

On appelle fonction de défaillance la fonction F définie pour tout $t \geq 0$

$$F(t) = P(T \leq t)$$

(3.1)

Le nombre $F(t)$ représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard ait une défaillance avant l'instant t . La figure I.1 donne l'allure de cette fonction

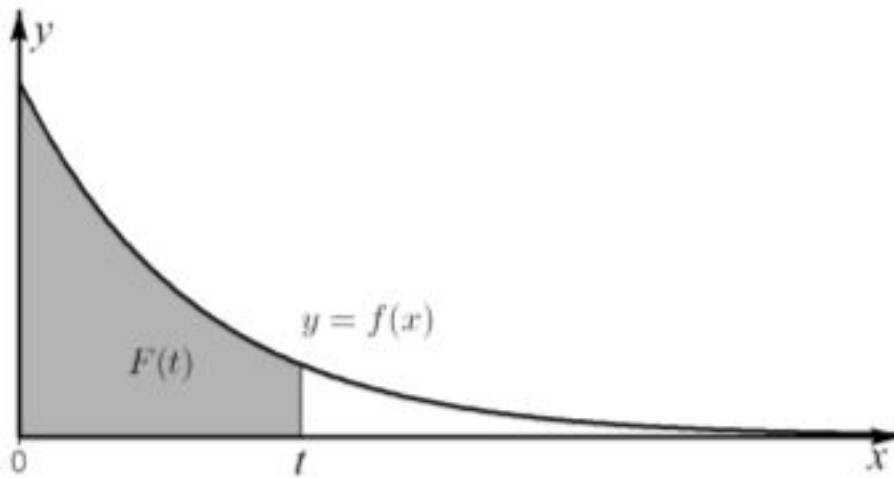


FIG. 3.1 : Fonction de défaillance

Cette fonction nous amène naturellement une fonction associée : la fonction de fiabilité R définie pour tout $t \geq 0$ par : $R(t) = 1 - F(t)$. Le nombre $R(t)$ représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard dans la population n'ait pas de défaillance avant l'instant t . La figure suivante montre les deux fonctions associées.

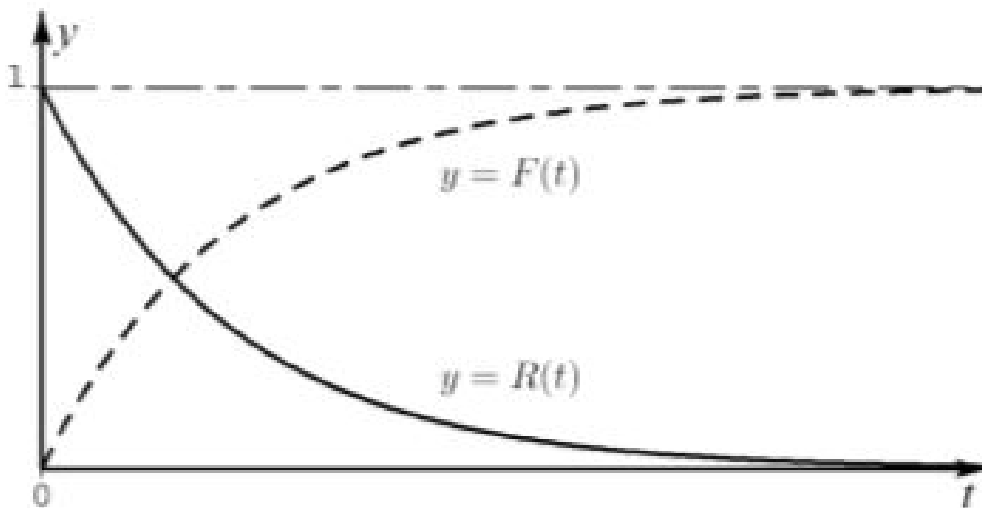


FIG. 3.2 : Fonctions associées

Le taux d'avarie moyen dans l'intervalle de temps $[t, \Delta t +]$ est alors :

$$\frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \times \frac{1}{\Delta t} \quad (3.2)$$

3.3.1.1 Taux de défaillance instantané

C'est la probabilité ($0 < R < 1$); un produit doit accomplir de manière satisfaisante une fonction requise, sous des conditions données et pendant une période de temps donnée. L'écriture mathématique du taux de défaillance à l'instant t , noté $\lambda(t)$, défini ainsi :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \right) \quad (3.3)$$

Δt , mesure la probabilité qu'une défaillance d'un dispositif se produise dans l'intervalle de temps $[t, t + \Delta t]$ sachant que ce dispositif a bien fonctionné jusqu'à l'instant (t) .

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= - \frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \\ &= \frac{dF(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \\ &= \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - R(t)} \end{aligned} \quad (3.4)$$

où R est la fonction de fiabilité de ce matériel. On est alors amené à résoudre une équation différentielle du 1er ordre. En effet si $\lambda(t)$ est connu, la résolution de l'équation différentielle linéaire du 1er ordre :

$$R'(t) + \lambda(t)R(t) = 0 \quad (3.5)$$

Donne la fonction de fiabilité R du matériel. On déduit alors la fonction de défaillance F qui est la fonction de répartition de la variable Z puis la densité de probabilité f de Z qui est la dérivée de F .

On a alors :

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x) dx} \quad \text{et} \quad F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(x) dx} \quad (3.6)$$

3.4 Indicateurs de fiabilité (λ) et (MTBF) :

Précédemment le taux de défaillance a été défini par des expressions mathématiques à travers un calcul de probabilité. On peut également l'exprimer par une expression physique. Il caractérise la vitesse de variation de la fiabilité au cours du temps. La durée de bon fonctionnement est égale à la durée totale en service moins la durée des défaillances.

$$\lambda = \frac{\text{nombre total de défaillances pendant le service}}{\text{durée total de bon fonctionnement}} \quad (3.7)$$

3.4.1 Temps moyen de bon fonctionnement :

Le MTBF (Mean Time Between Failure) est souvent traduit comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement mais représente la moyenne des temps entre deux défaillances. En d'autres termes, Il correspond à l'espérance de la durée de vie t .

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3.8)$$

Physiquement le MTBF peut être exprimé par le rapport des temps.

$$MTBF = \frac{\text{somme des temps de fonctionnement entre les (n) défaillances}}{\text{nombre d'intervention de maintenance avec immobilisation}}$$

$$\text{Si } \lambda \text{ est constant : } MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

(3.9)

Par définition le MTBF est la durée de vie moyenne du système.

3.4.1.1 Moyenne des temps de bon fonctionnement MUT (Mean Up Time)

C'est le temps moyen jusqu'à défaillance (ou moyenne des temps de bon fonctionnement).

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

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

(3.10)

3.4.1.2 Temps moyen pour réparer MTTR (Mean Time To Repair)

Exprime la moyenne des temps de tâches de réparation. Il est calculé en additionnant les temps actifs de maintenance et les temps annexes de maintenance, le tout divisé par le nombre d'interventions.

$$MTTR = \frac{\text{Temps d'arrêt total}}{\text{nombre d'arrêts}}$$

(3.11)

3.4.1.3 Taux de réparation

La probabilité de réparation d'un composant est en 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 est exprimé comme suit :

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

(3.12)

3.4.1.4 Disponibilité

La disponibilité est la probabilité de bon fonctionnement d'un dispositif à l'instant (t). Le mot disponibilité est la traduction du mot « availability » notée D(t) :

$$D = \frac{\Sigma \text{temps de bon fonctionnement}}{\Sigma \text{temps entre défaillances}}$$

$$D = \frac{\text{MUT}}{\text{MUT} + \text{MTTR}} = \frac{\text{MUT}}{\text{MTBF}}$$

(3.13)

3.5 Les différentes phases du cycle de vie d'un produit :

L'évolution du taux de défaillance d'un produit pendant toute sa durée de vie est caractérisée par ce qu'on appelle en analyse de fiabilité la courbe en baignoire (figure 3.3). Le taux de défaillance est élevé au début de la vie du dispositif. Ensuite, il diminue assez rapidement avec le temps (taux de défaillance décroissant), cette phase de vie est appelée période de jeunesse. Après, il se stabilise à une valeur qu'on souhaite aussi basse que possible pendant une période appelée période de vie utile (taux de défaillance constant). A la fin, il remonte lorsque l'usure et le vieillissement font sentir leurs effets, c'est la période de Vieillessement (taux de défaillance croissant) :

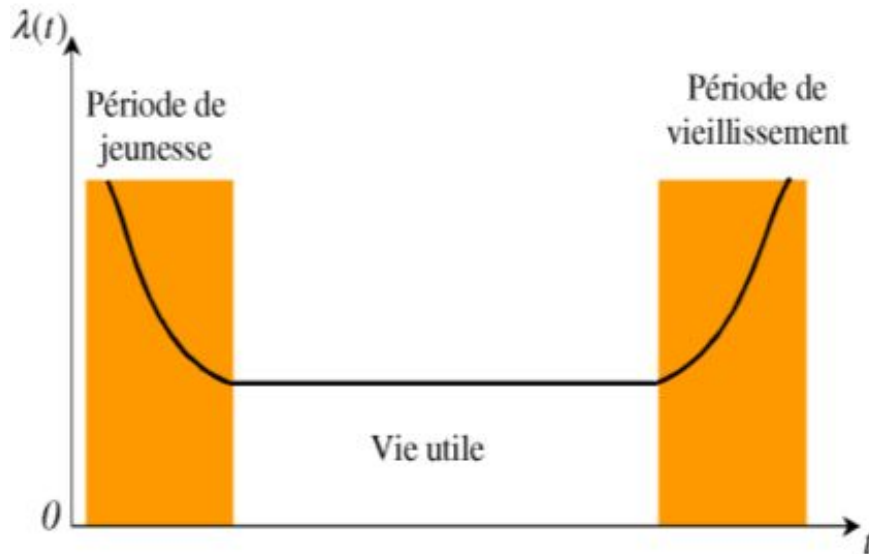


FIG. 3.3 : La courbe en baignoire

De nombreux éléments, tels que les composants électroniques, ont un taux de défaillance qui évolue de cette manière là.

Pour souligner la particularité des composants mécaniques dans l'analyse de la fiabilité par rapport aux composants électroniques, nous allons comparer l'évolution du taux de défaillance dans les deux cas.

3.5.1 Taux de défaillance pour des composants électroniques

L'expérience a montré que pour des composants électroniques la courbe, représentant le taux de défaillance en fonction du temps t , a la même allure que la courbe en baignoire figure I.3. Elle est donc composée de trois phases :

(1) Phase 1

La première phase définit la période de jeunesse, caractérisée par une décroissance rapide du taux de défaillance. Pour un composant électronique cette décroissance s'explique par l'élimination progressive de défauts dus aux processus de conception ou de fabrication mal maîtrisé ou à un lot de composants mauvais. Cette période peut être minimisée pour les composants vendus aujourd'hui. En effet, les fabricants de composants électroniques se sont engagés à vérifier la qualité de leurs produits en sortie de fabrication.

(2) Phase 2

La deuxième phase définit la période de vie utile généralement très longue. Le taux de défaillance est approximativement constant. Le choix de la loi exponentielle, dont la propriété principale est d'être sans mémoire, est tout à fait satisfaisant. Les pannes sont dites aléatoires, Leur apparition n'est pas liée à l'âge du composant mais à d'autres mécanismes d'endommagement. Les calculs prévisionnels de fiabilité se font presque souvent dans cette période de vie utile.

(3) Phase 3

La dernière phase est la période de vieillissement, elle est caractérisée par une augmentation progressive du taux de défaillance avec l'âge du dispositif. Ceci est expliqué par des phénomènes de vieillissement tels que l'usure, l'érosion, etc. Cette période est très nettement au-delà de la durée de vie réelle d'un composant électronique. Parfois, on réalise des tests de vieillissement accélérés pour révéler les différents modes de défaillance des composants.

3.5.2 Taux de défaillance pour des composants mécaniques

Les composants mécaniques sont soumis, dès le début de leur vie, au phénomène d'usure ou de vieillissement. Si on trace la courbe du taux de défaillance, en fonction du temps, on obtient une courbe qui ne présente pas le plateau de la figure I.4 la période de vie utile (taux de défaillance constant) n'existe pas ou elle est réduite. Le taux de défaillance du dispositif est une fonction non linéaire du temps et ceci dans chaque phase de sa vie (voir figure 3.4) :

(1) phase 1 :

La première phase définit la période de mortalité infantile. C'est une durée de vie en principe très courte Elle décrite par une décroissance progressive du taux de défaillance avec le temps dû à une amélioration des caractéristiques internes (caractéristiques de défauts) et des interfaces, par un rodage préalable des pièces. Par conséquent il n'est pas souhaitable de tester les composants mécaniques dans cette période de leur vie.

(2) phase 2 :

La dernière phase définit la période de vieillissement qui comporte la majorité de la vie du dispositif. Elle est caractérisée par une augmentation progressive du taux de défaillance. Les pièces mécaniques sont soumises à des phénomènes de vieillissement multiples qui peuvent agir en combinaison : corrosion, usure, déformation, fatigue, et finalement perte de résilience ou fragilisation. Contrairement aux composants électroniques les calculs de la fiabilité pour des composants mécaniques se font essentiellement dans la période de vieillissement, en utilisant des lois de Probabilité dont le taux de défaillance est fonction du temps telles que la loi Log-normale, Weibull, ... etc.

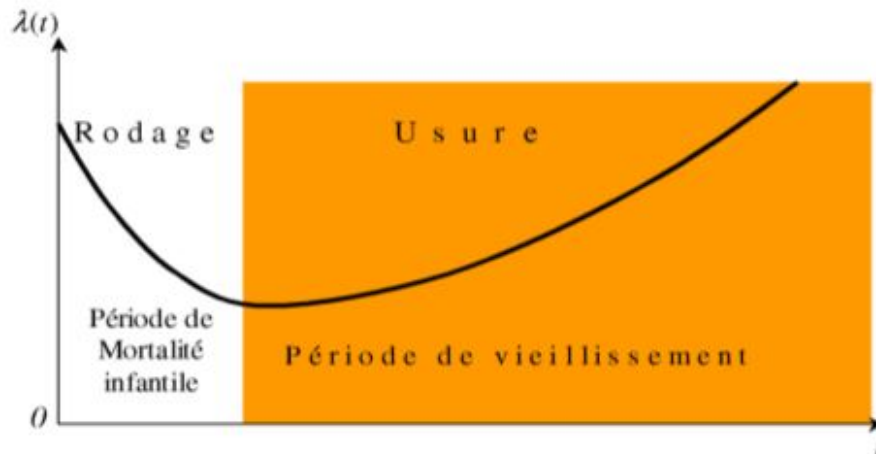


FIG. 3.4 : Courbe du taux de défaillance en mécanique

3.6 Objectifs et intérêts de la fiabilité en mécanique

L'analyse de la fiabilité constitue une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement. A l'origine, la fiabilité concernait les systèmes à haute technologie (centrales nucléaires, aérospatial). Aujourd'hui, la fiabilité est devenue un paramètre clé de la qualité et d'aide à la décision, dans l'étude de la plupart des composants, produits et processus "grand public" : Transport, énergie, bâtiments, composants électroniques, composants mécaniques....

De nombreux industriels travaillent à l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité de leurs produits au cours de leur cycle de développement, de la conception à la mise en service (conception, fabrication et exploitation) afin de développer leurs connaissances sur le rapport Coût/Fiabilité et maîtriser les sources de défaillance.

L'analyse de la fiabilité dans le domaine de la mécanique est un outil très important pour caractériser le comportement du produit dans les différentes phases de vie, mesurer l'impact des modifications de conception sur l'intégrité du produit, qualifier un nouveau produit et améliorer ses performances tout au long de sa mission.

3.7 Evolution des coûts en fonction de la fiabilité

Le non fiabilité augmente les coûts d'après vente (garanties, frais judiciaires). Construire plus fiable, augmente les coûts de conception et de production. Le coût total prend en compte ces deux contraintes.

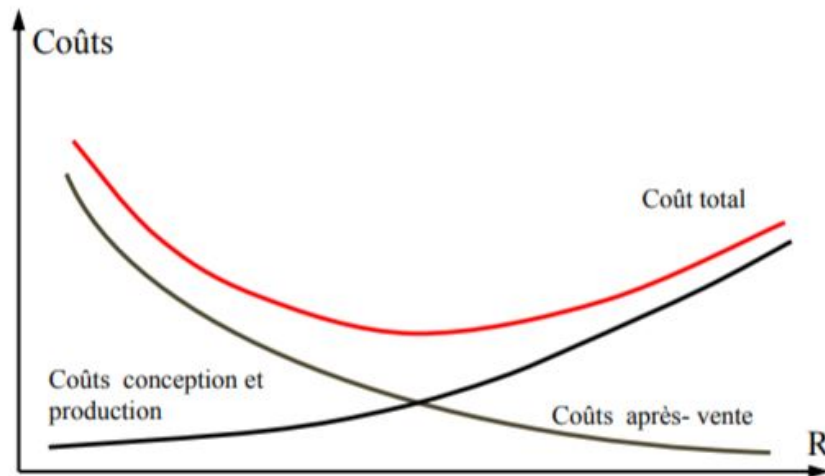


FIG. 3.5 : Courbes d'évolution des coûts en fonction de la fiabilité

La fiabilité d'une machine a tendance à diminuer avec le nombre de ses composants ou de leurs complexités. La maîtrise de la fiabilité devient donc plus délicate. Une très haute qualité pour chaque composant, n'entraîne pas nécessairement une grande fiabilité. Après assemblage, les interactions entre les composants diminuent la capacité de l'ensemble.

Une grande fiabilité sous certaines conditions, n'implique pas une grande fiabilité sous d'autres conditions (exemple : une huile moteur de synthèse prévue pour des moteurs moderne (multisoupapes et turbo) ne convient pas forcément pour un moteur de conception plus rudimentaire (tondeuse, moteur usé, voiture ancienne).

3.8 Fiabilité d'un système

La détermination de la fiabilité d'un système électronique, mécanique ou autre nécessite tout d'abord de connaître la loi de la fiabilité (ou la loi de défaillance) de chacun des composants intervenant dans le système. Ceci est simple pour certains types de systèmes tels que les systèmes électroniques, or ce n'est pas le cas pour des systèmes mécaniques à cause de la complexité de la structure du système étudié. Les systèmes mécaniques sont des ensembles d'éléments technologiques liés par des relations statiques et dynamiques assez complexes.

Pour un système électronique chaque composant a un poids important dans la fiabilité du système, la fiabilité du système est donc calculé en fonction de la fiabilité de tous ses composants. Les calculs sont effectués sous l'hypothèse que les taux de défaillance sont constants dans le temps, une hypothèse acceptable pour la plupart des composants, ce qui rend les calculs beaucoup plus simple. La détermination des taux de défaillance des composants est effectuée soit à partir des modèles développés dans des bases de données disponibles, soit à partir d'essais effectués sur les composants ou bien à partir des résultats d'exploitation des produits.

La fiabilité d'un système mécanique, contrairement à l'électronique, repose sur la fiabilité de quelques composants élémentaires responsables de son dysfonctionnement, dits

composants “responsables” ou “critiques” (parfois un seul).

3.8.1 Fiabilité de système constitué de plusieurs composants

- En série

La fiabilité R_s d'un ensemble de n constituants connectés en série est égale au produit des fiabilités respectives R_A, R_B, R_C, R_n de chaque composant.

$$R_s = R_A * R_B * R_C * \dots * R_n$$

Si les “ n ” composants sont identiques avec une même fiabilité R la formule sera la suivante :

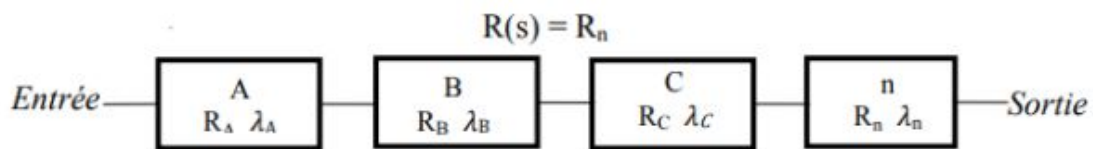


FIG. 3.6 : Composants en série

Si les taux de défaillances sont constants au cours du temps la fiabilité sera calculée suivant la formule :

$$R(s) = (e^{-\lambda_A t}) * (e^{-\lambda_B t}) * (e^{-\lambda_C t}) * \dots * (e^{-\lambda_n t})$$

Avec :

$$MTBF(s) = \frac{1}{\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \dots + \lambda_n}$$

(3.14)

Si en plus, les composants sont identiques : $A = B = C = \dots = n$

Alors

$$R(s) = (e^{-\lambda_n t}) \quad \text{et} \quad MTBF = \frac{1}{n \times \lambda}$$

(3.15)

En parallèle

La fiabilité d'un système peut être augmentée en plaçant les composants en parallèle. Un dispositif constitué de n composants en parallèle ne peut tomber en panne que si les

n composants tombent en panne au même moment. Si F_i est la probabilité de panne d'un composant, la fiabilité associée R_i est son complémentaire :

$$F_i = 1 - R_i$$

F_i représentant la fiabilité associée.

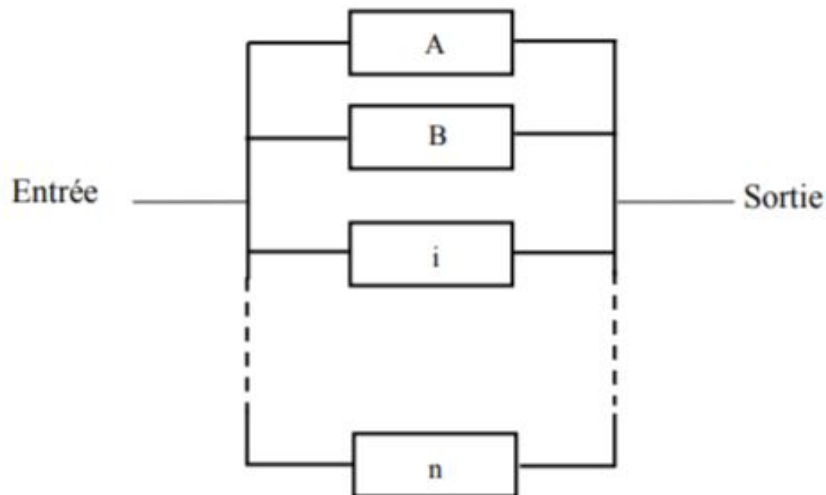


FIG. 3.7 : Composants en parallèle

Soit les "n" composants de la figure ci-dessous montés en parallèle. Si la probabilité de panne pour chaque composant repéré (i) est notée F_i alors :

$$R(s) = 1 - (1 - R)^n$$

Le cas particulier de deux dispositifs en parallèle si λ est constant R_S est obtenu par :

$$R_S = 1 - (1 - R_A) \cdot (1 - R_B) = R_A + R_B - R_A \cdot R_B = e^{-\lambda_A t} + e^{-\lambda_B t} - e^{-(\lambda_A + \lambda_B)t} \tag{3.16}$$

3.8.2 Cas des systèmes connectés en parallèle et dis en attente

3.8.2.1 Cas de deux composants en attente

Pour le système proposé, le composant A est en service actif et le composant B en attente. Si B tombe à tour en panne, il est automatiquement remplacé par C, etc. Si tous les composant sont identique avec λ constant, la fiabilité du dispositif est donnée par :

$$R(t) = e^{-\lambda t} + \lambda t e^{-\lambda t} = e^{-\lambda t}$$

Si A et B ne sont pas identiques la relation devient :

$$R(t) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) + e^{-\lambda_A t}$$

(3.17)

3.8.2.2 Cas de n composants en attente

Même démarche que précédemment, si A le composant actif tombe en panne, il est remplacé par B. Si B tombe à son tour en panne, il est automatiquement remplacé par C, etc. Si tous les composants sont identiques avec λ constant, la fiabilité du dispositif est donnée par :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^n}{n!} \right]$$

(3.18)

3.8.2.3 Cas où m composants sur les n sont nécessaires au succès du système

Si on suppose que le système se compose de n composants K, tous de même fiabilité R, et qu'il doit y avoir au moins deux composants en état de fonctionnement, la fiabilité de l'ensemble est donnée par la relation :

$$N(t) = N_0 = C^{te} \quad \text{et} \quad \lambda(t) = C^{te}$$

(3.19)

3.9 La relation entre la fiabilité et la maintenance :

Tous les équipements d'une installation industrielle sont soumis à des mécanismes de dégradation dus aux conditions de fonctionnement et/ou d'environnement : usure, fatigue, vieillissement. Face aux défaillances qui en résultent, on peut se contenter de pratiquer une maintenance corrective, mais on n'évite pas ainsi les conséquences des pannes que

l'on subit. Une attitude plus défensive consiste à mettre en œuvre une maintenance préventive destinée à limiter, voire à empêcher, ces défaillances, mais on court alors le risque de dépenses excessives et d'indisponibilités inutiles. Devant cette situation, le responsable de maintenance ne doit plus se contenter de surveiller et de réparer, il doit envisager des stratégies. Une part de son travail consiste à prévoir les événements et à évaluer les différentes alternatives qui s'offrent à lui pour trouver la solution optimale, ou tout au moins pour s'en rapprocher. Les forces dont il dispose, limitées par ses moyens techniques et financiers, doivent être placées aux bons endroits. C'est dans ce contexte que la maintenance s'est dotée de méthodes qui considèrent à la fois, et plus ou moins, la technique et l'organisation. Les industries de processus ont générale appliquée des démarches alliant une évaluation des risques, une analyse du retour d'expérience, et une logique de sélection de tâches de maintenance. L'Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité (OMF).

3.9.1 Principales liaisons fiabilité –maintenance

Les principales hypothèses retenues :

- Nous remarquons tout d'abord que les études de fiabilité et de maintenance sont faites en parallèle à différents stades (établissement du projet, fabrication, réception, transport, exploitation et renouvellement) ces études étant établies d'un point de vue à la fois technique et économique.

- Les opérations de maintenance, quelque soit le genre considéré, sont liées au caractère aléatoire de la durée de vie de l'élément et par suite, aux caractéristiques de fiabilité de l'élément : fonction de fiabilité, MTBF, taux de défaillance à l'instant t ,... etc.

- La fréquence des opérations de maintenance corrective est fonction des taux de panne ou risques de panne. De plus, nous pouvons dire que la maintenance corrective, faisant diminuer le taux de panne, améliore la fiabilité.

- Considérons le problème suivant : dans une entreprise, on se fixe un nombre $N(t)$ d'équipements identiques qu'on veut maintenir en service à chaque instant ; on se demande alors comment réaliser cet objectif ? Grâce à la fiabilité, on peut donner une réponse à cette question. Dans le cas particulier où :

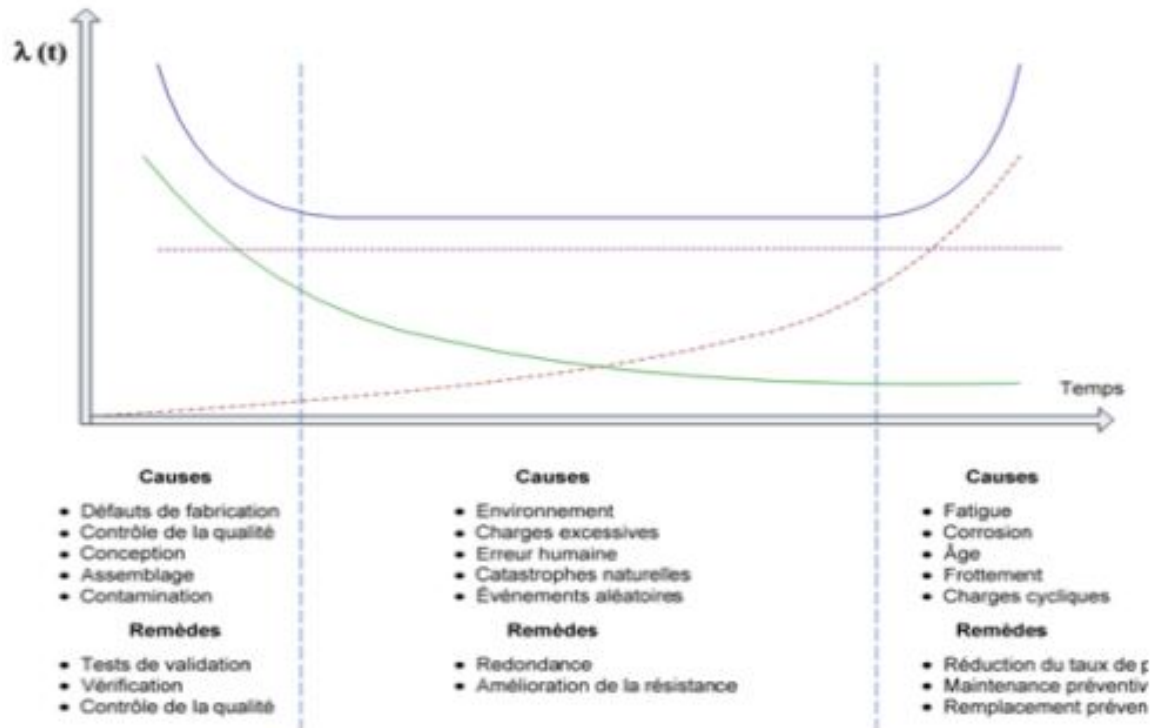


FIG. 3.8 : Evolution du taux de défaillance

3.9.2 Rôle de La maintenance préventive constituée

On examine les effets de la maintenance préventive sur la fiabilité d'un système ou d'un composant.

3.9.2.1 Maintenance idéale :

Elle permet la réalisation de deux tâches principales :

- Le système (composant) est rétabli dans un état aussi bon que le neuf.
- Il n'y a pas d'erreurs commises lorsque la maintenance préventive est exécutée

$R(t)$ = fiabilité du système

t = temps d'opération

$R_m(t)$ = fiabilité du système maintenu

T = temps auquel on effectue la maintenance

$$0 \leq t \leq T \Leftrightarrow R_m = R(T)$$

(3.20)

La maintenance n'a aucun effet sur la fiabilité du système entre [0 et T] Au temps T, on effectue la maintenance. Le système devient aussi bon que neuf.

L'effet de la maintenance idéale sur la fiabilité est représenté sur la figure suivante :

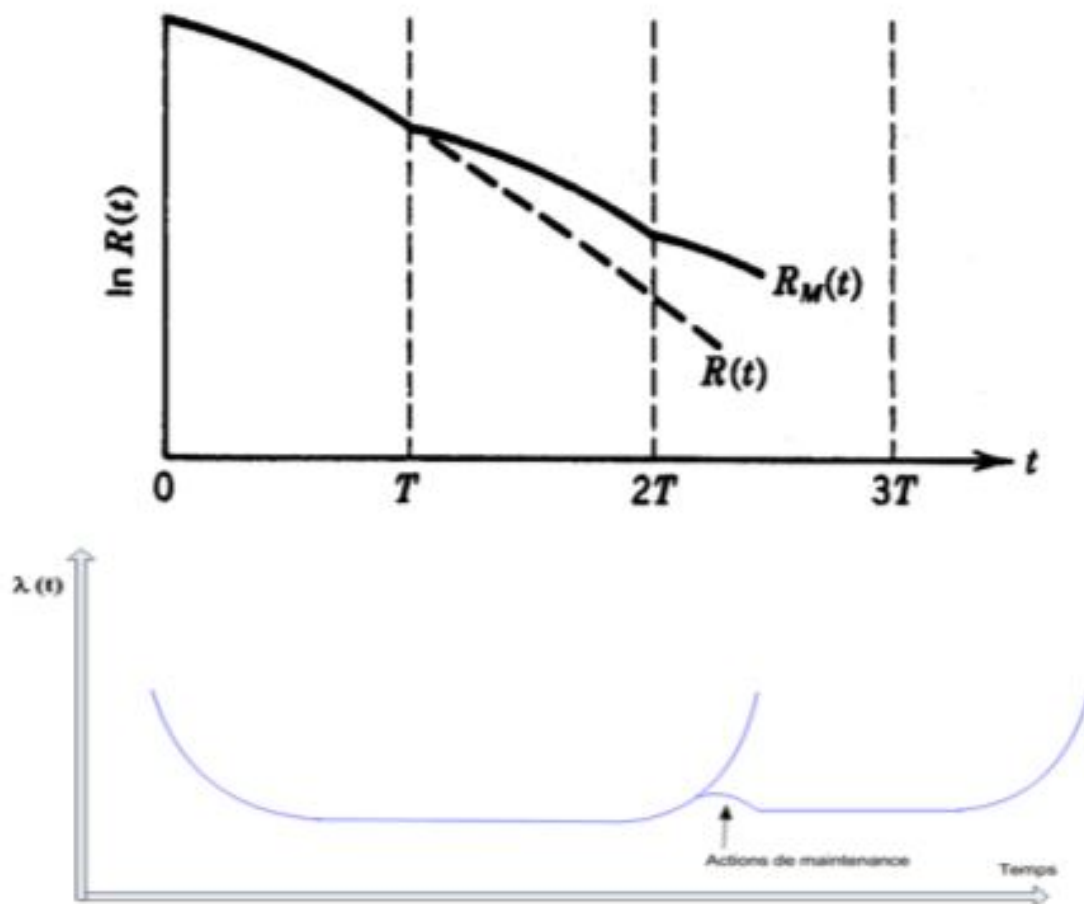


FIG. 3.9 : Effet de la maintenance sur la fiabilité

La prolongation de la durée de vie d'un matériel ne peut se faire que par des actions de maintenance. La figure I.9 schématise ces actions. la maintenance peut :

1. diminuer la fiabilité (erreur humaines dues à l'intervention),
2. n'avoir aucun effet (aucun mécanisme de vieillissement, aucun phénomène d'usure),
3. améliorer la fiabilité (présence de mécanisme de vieillissement, de phénomène d'usure).

La maintenance idéale est la probabilité que le système survive au temps t

$$T \leq t \leq 2T \quad \Leftrightarrow \quad R_m(t) = R(t) \cdot R(t - T)$$

Après 2 opérations de maintenance : $2T \leq t < 3T$

$$R_m(t) = R(T)^2 \cdot R(t - 2T)$$

(3.21)

Après N opérations de maintenance :

$$NT \leq t < (N + 1)T \quad \Leftrightarrow \quad R_m = R(T)^N \cdot R(t - NT)$$

(3.22)

En maintenance idéale la MTTF se calcul par l'expression :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R_m(t) dt = \sum_{N=0}^{\infty} \int_{NT}^{(N+T)} R_m(t) dt$$

$$= \sum_{N=0}^{\infty} \int_{NT}^{(N+T)} R(t)^N \cdot R(t - NT) dt$$

Pour $t' = T - NT$

$$MTTF = \sum_{N=0}^{\infty} R(T)^N \cdot \left[\int_0^T R(t)' dt' \right]$$

$$MTTF = \sum_{N=0}^{\infty} R(T)^N \cdot \left[\int_0^T R(t)' dt' \right]$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} R(T)^N = \frac{1}{1 - R(T)} \Leftrightarrow \text{série à l'infini}$$

$$\Leftrightarrow MTTF = \frac{\int_0^T R(t) dt}{1 - R(T)}$$

(3.23)

Effet de la maintenance sur la fiabilité : pour $\lambda = \text{constant}$. (Panne aléatoire, distribu-

tion exponentielle)

$$R_m(t) = (e^{-\lambda T})^N \cdot (e^{-\lambda T})^{(t-NT)} = e^{-\lambda t}$$

$$\Leftrightarrow R_m(t) = e^{-\lambda t}$$

(3.24)

Ceci implique que la maintenance n'a aucun effet sur la fiabilité du système dans le cas $\lambda = \text{constant}$.

Si on considère l'effet de vieillissement qu'on peut modéliser par la loi de Weibull à deux paramètres pour la simplification

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^m}$$

$$R_m(t) = e^{-N\left(\frac{T}{\theta}\right)^m} \cdot e^{-\left(\frac{t-NT}{\theta}\right)^m} \quad ; \quad NT \leq t < (N+1)T$$

$$\text{Pour } t = NT : \quad \frac{R_m(t)}{R(NT)} = e^{-N\left(\frac{T}{\theta}\right)^m + \left(\frac{NT}{\theta}\right)^m}$$

(3.25)

t après une maintenance préventive =0 Il y a un gain à faire de la maintenance préventive lorsque l'exposant $m > 0$:

$$\text{Ou} \quad \left(\frac{NT}{\theta}\right)^m > N\left(\frac{T}{\theta}\right)^m \quad \Leftrightarrow N^{m-1} > 0$$

(3.26)

Si $m > 1$: Faire la maintenance préventive (MP a un effet positif)

Si $m = 1$: Distribution exponentielle (MP n'a pas d'effet sur la fiabilité)

Si $m < 1$: MP diminue la fiabilité (dans la période de rodage par exemple)

3.10 Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité :

Il est toujours possible d'associer à une variable aléatoire une probabilité et définir ainsi une loi de probabilité. Lorsque le nombre d'épreuves augmente indéfiniment, les

fréquences observées pour le phénomène étudié tendent vers les probabilités et les distributions observées vers les distributions de probabilité ou loi de probabilité. Une loi de probabilité est un modèle représentant "au mieux", une distribution de fréquences d'une variable aléatoire.

3.10.1 La loi exponentielle

En raison des applications multiples de cette loi qui n'est autre qu'un cas particulier de la loi de Weibull, on présentera dans ce qui suit un large développement de cette loi avec plusieurs applications.

Nous allons étudier des phénomènes physiques où la durée de vie est l'intervalle de temps écoulé entre l'instant de la mise en fonctionnement ou de la naissance, et l'instant de la première panne ou de la mort.

La plupart des phénomènes naturels sont soumis au processus de vieillissement. Il existe des phénomènes où il n'y a pas de vieillissement ou d'usure. Il s'agit en général de phénomènes accidentels. Pour ces phénomènes, la probabilité, pour un objet d'être encore en vie ou de ne pas tomber en panne avant un délai donné sachant que l'objet est en bon état à un instant t , ne dépend pas de t . Par exemple, pour un verre en cristal, la probabilité d'être cassé dans les cinq ans ne dépend pas de sa date de fabrication ou de son âge. Par définition, on dit qu'une durée de vie est sans usure si la probabilité de survie à l'instant t ne dépend pas de t .

Les modèles de fiabilité basés sur le taux de panne aléatoire sont les plus utilisés
Hypothèses :

- Le taux de défaillance $\lambda(t)$ est indépendant de l'âge du système
- Pour le système qui opère sur demande, la panne à la n ème demande est indépendante de celles à la $n-1$ demande.
- Pour le système opérant en continu, ceci représente un $\lambda(t)$ constant Pour caractériser la durée de vie et mettre en évidence la notion de vieillissement. On montre en particulier l'utilité pratique de la loi exponentielle pour approcher la distribution des temps de panne. La distribution exponentielle s'exprime ainsi :

$$\text{Fiabilité : } R(t) = e^{-\lambda t} \tag{3.27}$$

Avec les paramètres de significations :

- e : est la base de l'exponentielle (2,718...)
- λ c'est l'intensité.

Densité de probabilité : $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ (II.16) :

La fonction de répartition $F(t) = 1 - e^{-\lambda t} = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt$

Taux de défaillance : $\lambda = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda = \text{constant}$

(3.28)

La moyenne des temps de fonctionnement (MTTF) ou de bon fonctionnement (MTBF) un important estimateur de la fiabilité et de la disponibilité des systèmes et se calcul par l'expression :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

$$\text{Variance : } \sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2}$$

(3.29)

Les distributions relatives à cette loi sont représentées par les courbes de la figure en fonction du taux de défaillance d'un ou plusieurs composants supposés avoir un même λ

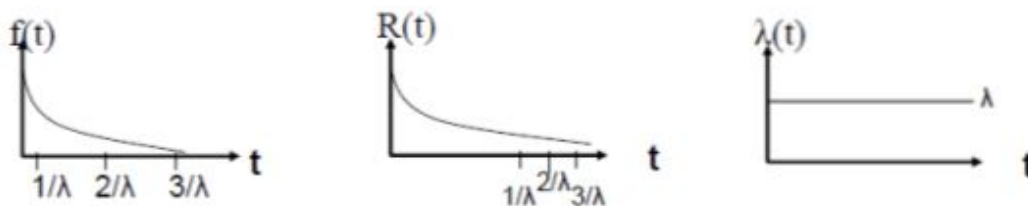


FIG. 3.10 : Distribution des fonctions de la loi exponentielle

3.10.2 La loi normale

Cette loi est aussi appelée loi de Gauss, en l'honneur du grand mathématicien allemand Karl Friedrich Gauss (1777-1855).

La loi normale est la loi statistique la plus répandue et la plus utile, elle est utilisée afin d'approcher des probabilités associées a des variables aléatoires binomiales possédant un paramètre 'n' très grand. Elle représente beaucoup de phénomènes aléatoires. De plus, de nombreuses autres lois statistiques peuvent être approchées par la loi normale, tout spécialement dans le cas des grands échantillons.

Sa fonction de fiabilité est :

$$n(t) = \frac{n}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.30)$$

Avec les paramètres de signification :

- μ : est la moyenne
- σ : l'écart type
- n : le nombre total d'individus dans l'échantillon
- $n(x)$: le nombre d'individus pour lesquels la grandeur analysée a la valeur x .
- e : est la base de l'exponentielle (2,718...)

3.10.2.1 La loi log normal

On a pu voir que les valeurs possibles d'une variable aléatoire normale étaient l'ensemble des nombres réels. Pour une situation réelle ne pouvant prendre des valeurs négatives, on peut malgré tout utiliser une loi normale lorsque la moyenne et l'écart type sont tels que la probabilité théorique d'avoir une valeur négative est à toute fin pratique nulle.

En probabilité et statistique, une variable aléatoire X est dite suivre une loi log-normale de paramètres μ et σ si la variable $Y = \ln(X)$ suit une loi normale de paramètres μ et σ .

Une variable peut être modélisée par une loi log-normale si elle est le résultat de la multiplication d'un grand nombre de petits facteurs indépendants. Sa fonction de probabilité est :

$$n(t) = \frac{n}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.31)$$

Avec les paramètres de signification :

- σ : l'écart type
- μ : c'est la moyenne

3.10.3 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 fonction-

nement 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.

-Sa variance :

$$V = nP(1 - P)$$

-Son écart type :

$$\sigma = \sqrt{nP(1 - P)}$$

(3.32)

3.10.4 Loi de poisson ou la loi de faibles probabilités

La réalisation d'événement 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 événement lorsque celui-ci peut se manifester de nombreuses manières mais avec une faible probabilité.

- sa variance

$$m = \gamma t$$

-sa fréquence :

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

-sa fonction de répartition :

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

(3.33)

3.10.5 La loi de Weibull

L'expression loi de Weibull recouvre en fait toute une famille de lois, certaines d'entre elles apparaissant en physique comme conséquence de certaines hypothèses. C'est en particulier, le cas de la loi exponentielle ($\beta = 1$) et de la loi normale ($\beta = 3$).

Sa fonction de fiabilité est :

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

(3.34)

Avec les paramètres de signification : γ β η définissent la distribution de Weibull.

On utilise trois paramètres :

β : paramètre de forme ($\beta > 0$)

η : paramètre d'échelle ($\eta > 0$)

γ : paramètre de position ($-\infty > \gamma > +\infty$)

3.11 Fonction de fiabilité $R(t)$

La forme générale de la fonction de fiabilité est désignée par $R(t)$ représentant la probabilité de bon fonctionnement à l'instant t .

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

(3.35)

La signification des paramètres a été décrite aux chapitres précédents. Sa fonction de répartition $F(t)$ est la probabilité que le dispositif soit en panne à l'instant t . Elle est exprimée par :

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

(3.36)

Son taux instantané de défaillance $\lambda(t)$ est un estimateur de fiabilité. Il s'exprime par :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \tag{3.37}$$

Remarque si :

$$\left. \begin{matrix} \gamma = 0 \\ \beta = 1 \end{matrix} \right\} \Rightarrow \lambda = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{\text{MTBF}} \tag{3.38}$$

Sa densité de probabilité $f(t)$ se calcule par l'expression suivante :

$$f(t) = \lambda(t) \times R(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-\gamma} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)} \tag{3.39}$$

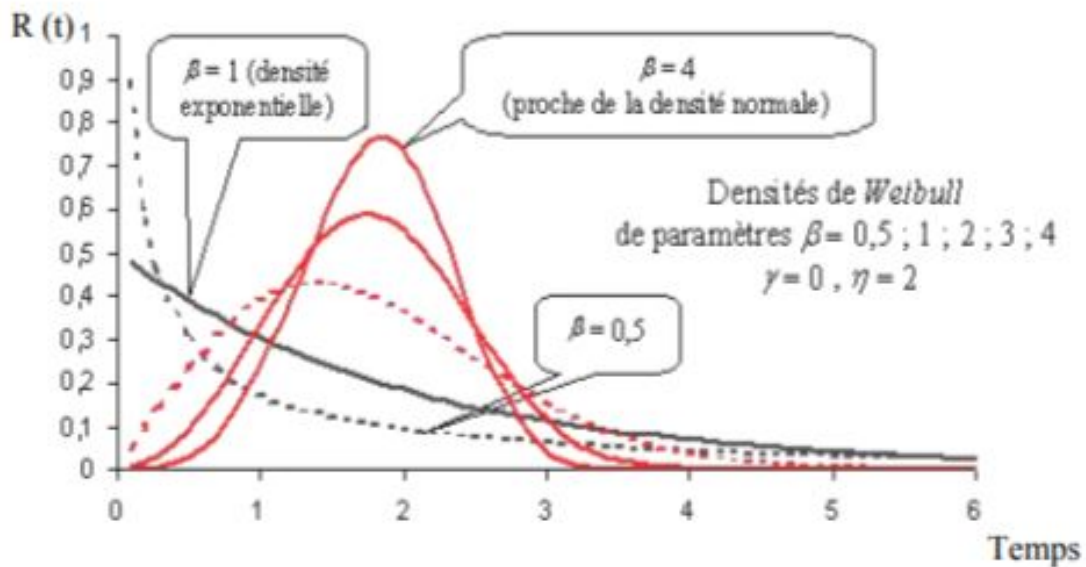


FIG. 3.11 : Courbes théoriques de Weibull

Si l'on désigne par t la variable aléatoire qui, à tout matériel choisi au hasard, associe

son temps de bon fonctionnement avant défaillance, lorsque β est constant, on montre que t suit une loi exponentielle.

Pour couvrir tous les cas, Weibull a choisi pour une fonction dépendant de trois paramètres : γ , β et η . Avec $t > \gamma$, $\beta > 0$, $\eta > 0$ (le paramètre important étant le paramètre "de forme", les autres terminent l'ajustement). Ainsi, lorsque la variable aléatoire t , correspondant au temps de bon fonctionnement, suit la loi de Weibull de paramètres γ , β et η .

3.12 Domaine d'application

La distribution de Weibull est souvent utilisée dans le domaine de l'analyse de la durée de vie, grâce à sa flexibilité car elle permet de représenter au moins approximativement une infinité de lois de probabilité. Un taux de panne croissant suggère une "usure ou un problème de fiabilité" : les éléments ont de plus en plus de chances de tomber en panne quand le temps passe.

3.12.1 Papier de Weibull

Ce papier de Weibull sert à lire graphiquement les paramètres d'une loi de Weibull dans le cas où le paramètre γ est nul. En effet, la fonction de répartition associée à une loi de Weibull de paramètres β , $\gamma = 0$, η est définie par :

3.12.1.1 Echelles utilisées sur le papier de Weibull

$$\begin{aligned} \Rightarrow \ln(1 - F(t)) &= -\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \\ \Rightarrow -\ln(1 - F(t)) &= \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta \\ \Rightarrow \ln(-\ln(1 - F(t))) &= \beta \ln \frac{t}{\eta} \\ \Rightarrow \ln(-\ln(1 - F(t))) &= \beta \ln t - \beta \ln \eta \\ \Rightarrow Y &= \beta X - \beta \ln \eta \end{aligned} \tag{3.40}$$

La dernière équation obtenue est l'équation d'une droite dans le repère rouge (O; X; Y) où O est le point correspondant à $X = 0$ et $Y = 0$ soit à $t = 1$ et $F(t) = 1 - 1/e$.

Le paramètre se lit directement à l'intersection de la droite précédente avec l'axe des abscisses puisque celui-ci est gradué en échelle logarithmique.

Le paramètre est le coefficient directeur de la droite précédente, il suffit de tracer une droite parallèle à la précédente et de lire directement le coefficient directeur de cette droite sur l'axe d'équation $X = -1$.

3.12.1.2 Echelles utilisées sur le papier de Weibull

Abscisse haute : échelle naturelle en X Abscisse intermédiaire : échelle logarithmique (lecture du paramètre t) Abscisse basse : échelle logarithmique (on fait correspondre à chaque valeur de t son logarithme népérien $\ln t$). Ordonnée gauche : on place les valeurs de $F(t)$ en pourcentage en échelle $\ln(-\ln(1-F(t)))$ Ordonnée sur l'axe $X = -1$ (lecture du paramètre) : ce sont les valeurs $\ln(-\ln(1-F(t)))$

3.12.1.3 Echelles utilisées sur le papier de Weibull

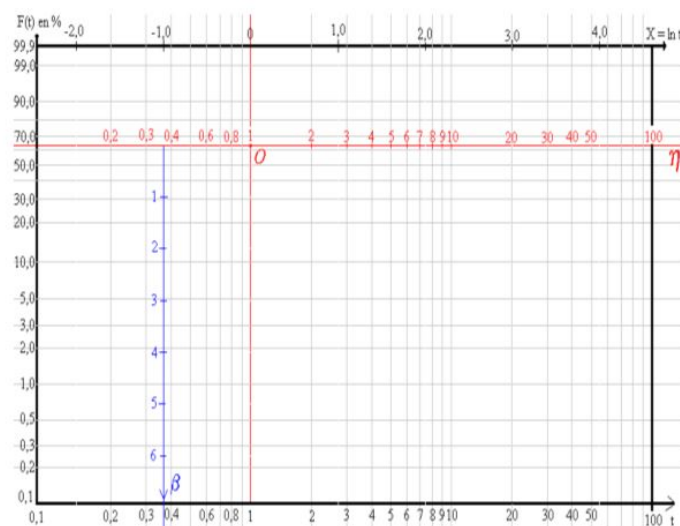


FIG. 3.12 : Papier de Weibull

A titre d'exemple :

On construit tout d'abord le nuage de points $(t; F(t))$ puis une droite d'ajustement D , on lit la valeur du paramètre sur l'axe des abscisses puis on trace la parallèle D' à la droite D passant par l'origine O du repère, on lit le paramètre sur l'axe d'équation $X = -1$.

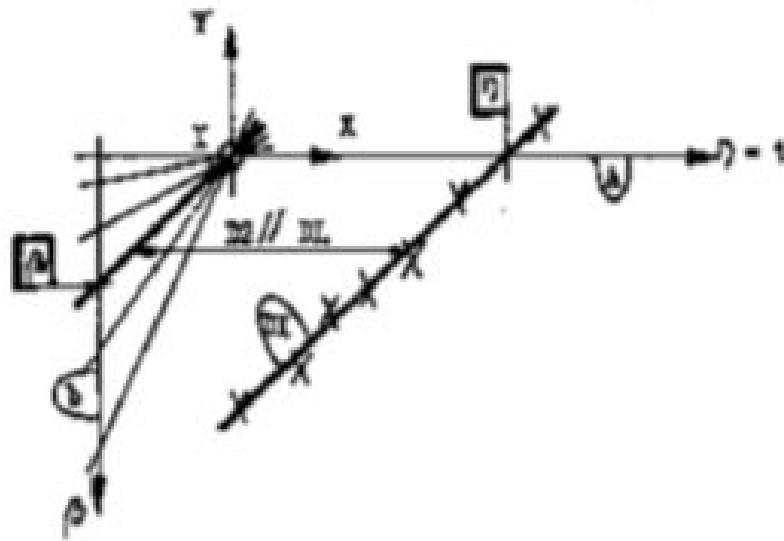


FIG. 3.15 : Recherche de bêta

Remarque :

Si le nuage de point met en évidence plusieurs droites, on déterminera plusieurs pentes b montrant des populations distinctes qui correspondent à des modes de défaillances successifs et différents (défaillances juvéniles suivit de défaillances par usure par exemple).

3.12.1.4 Signification des paramètres

- Paramètre d'échelle η : Ce paramètre permet d'utiliser le papier d'Allan Plait quelque soit l'ordre de grandeur de t . Il n'a donc pas à être interprété.

- Paramètre de forme bêta β : Ce paramètre donne des indications sur le mode des défaillances et sur l'évolution du taux de défaillances dans le temps. Les courbes des figures 3.16, 3.17 et 3.18, illustrent respectivement l'évolution de la fiabilité, de la fonction de répartition et du taux de défaillance en fonction du paramètre de forme (β).

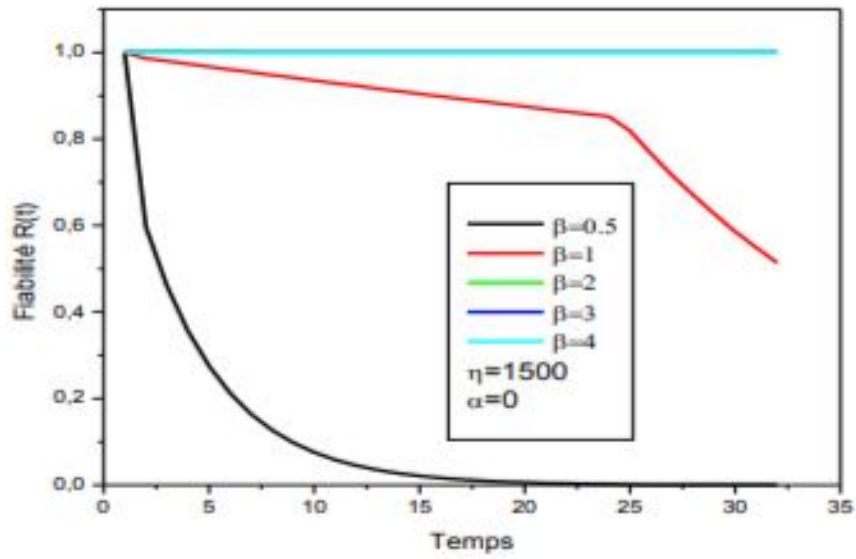


FIG. 3.16 : Fiabilité

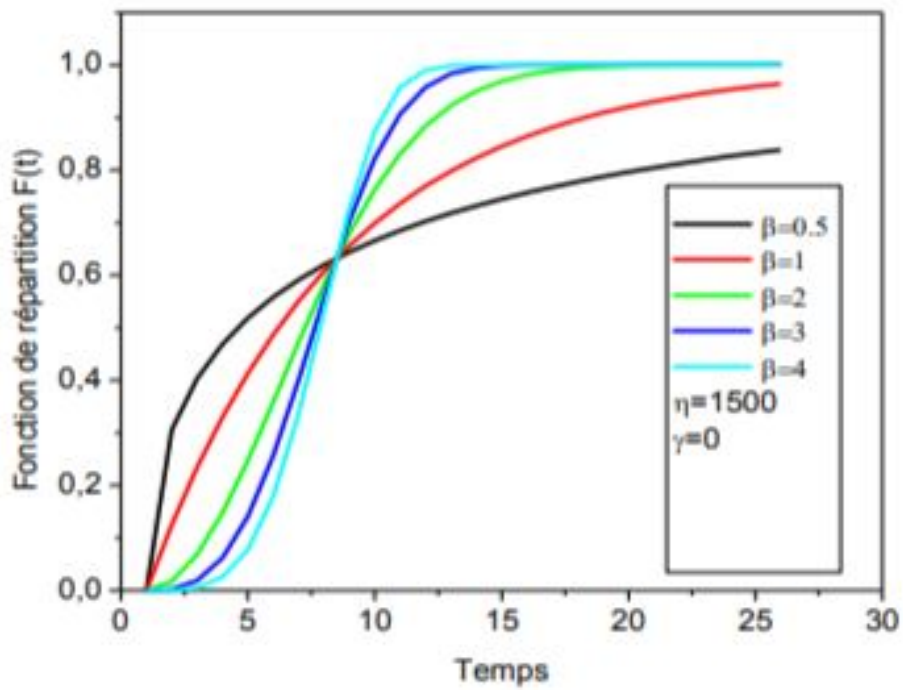


FIG. 3.17 : Fonction de répartition

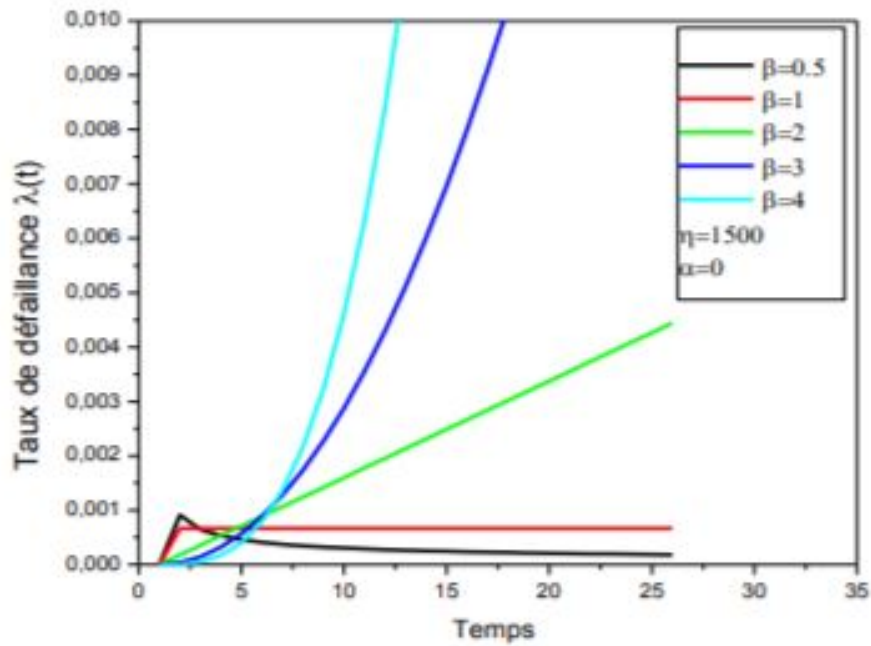


FIG. 3.18 : Taux de défaillance

On peut donc remarquer que si : $\beta \lambda(t)$ décroît \rightarrow période de jeunesse. $\beta = 1 \Rightarrow \lambda(t) = \text{cte} \rightarrow$ indépendance du temps. $\beta > 1 \Rightarrow \lambda(t)$ croît \rightarrow période d'obsolescence. $-1.5 < \beta < 2.5 \rightarrow$ exprime un phénomène de fatigue. $-3 < \beta < 4 \rightarrow$ exprime un phénomène d'usure.

Remarque : Si $\beta = 3.5 \Rightarrow f(t)$ symétrique \Rightarrow distribution normale. Le paramètre de position gamma donne des indications sur le retard de la fonction $f(t)$. La figure 3.6d montre cette variation

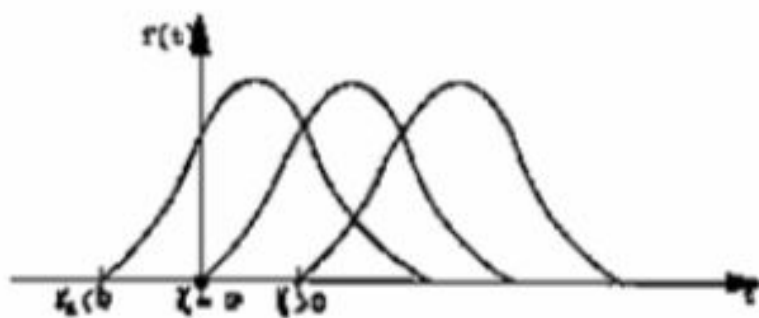


FIG. 3.19 : Les courbes de $f(t)$

- Avec $\gamma < 0$ ceci explique qu'une probabilité de défaillance est déjà présente au moment de l'installation du système.
- Avec $\gamma = 0$ une probabilité de défaillance sera présente dès la mise en service du Système .
- Avec $\gamma > 0$ une probabilité de défaillance dans les premières utilisations du système

est nulle.

Chapitre 4

Partie pratique : estimation de la fiabilité d'une turbine dr 990

4.1 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 DR990 de faire face à l'étude expérimentale de la fiabilité de la turbine tout en traçons les courbes de ces fonctions.

4.2 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
1	13/02/2016	18/10/2016	24	5952	240	- Inspection boroscopique des parties chaude. - changement des joints des thermo couples et injecteur de gaz.
2	28/10/2016	05/06/2017	06	5304	72	- Appoint d'huile pour KT501.
3	08/06/2017	31/10/2017	08	3408	120	- Changement de filtre d'aire de la turbine.
4	04/11/2017	05/05/2018	10	5064	120	- Changement de filtre d'huile étanchéité.
5	10/05/2020	20/06/2018	12	960	24	- Intervention sur circuit de graissage.
6	21/06/2018	21/06/2018	03	192	24	- Vidange d'huile de lubrification de la caisse et changement de filtre.
7	22/06/2018	12/07/2019	48	912	336	- Intervention sur moteur électrique GTG-ME-205-KT501.
8	26/07/2019	03/08/2020	15	9840	168	- Intervention sur circuit de graissage.
9	10/08/2020	26/09/2020	170	1104	1180	- révision générale sur Turbine à gaz k501.

TAB. 4.1 : Dossier historique de la turbine DR990

4.3 L'application pratique des méthodes d'analyse

4.3.1 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°	organe	TA (h)	Cumul TA	% TA	% cause	% cause
01	moteur électrique	336	336	30.43	14.28	14.28
02	thermo couples et injecteur de gaz.	240	576	52.17	14.28	28.56
03	circuit de graissage	192	768	69.56	14.28	42.84
04	filtre d'huile étanchéité	120	888	80.43	14.28	57.12
05	filtre d'aire de la turbine	120	1008	91.30	14.28	71.4
06	huile pour KT501	72	1080	97.82	14.28	85.68
07	lubrification de la caisse et changement de filtre.	24	1104	100	14.28	100

FIG. 4.1 : L'analyse « ABC (Pareto) »

4.3.2 La courbe d'analyse ABC

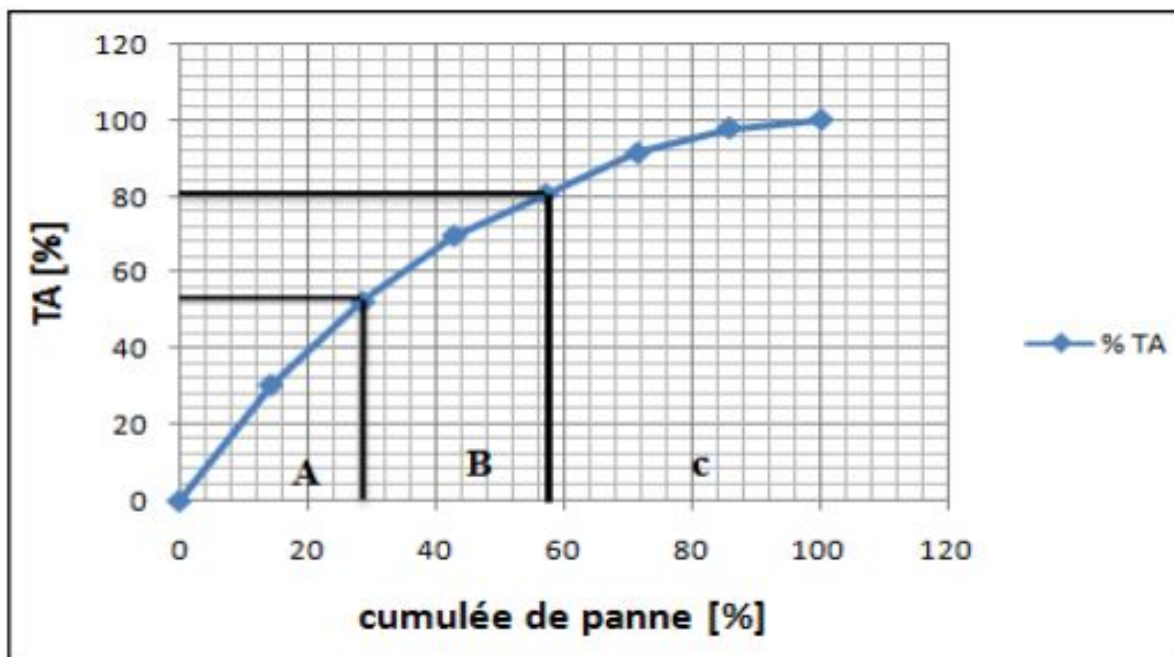


FIG. 4.2 : La courbe d'ABC

4.3.3 Interpretation des résultats

Zone "A": Dans cette zone, on constate que environ 28.56% des causes représente 52.17% des heures d'arrêts, ceci constitue la zone A, (zone du moteur électrique, thermo couples et injecteur de gaz)

Zone "B": Dans cette tranche, les 28.56 % des causes représentent 28.26 % supplémentaire (circuit de graissage, filtre d'huile étanchéité).

Zone "C": Dans cette zone les 42.88 % des causes restantes ne représentent qu'ont 19.57 % des heures d'arrêts (filtre d'huile étanchéité, filtre d'aire de la turbine, huile pour KT501 et lubrification de la caisse et changement de filtre).

4.4 Calcul des paramètres de weibull

Le tableau suivant comporte les TBF classés par ordre croissant, et les F(i) calculés par la méthode des rangs médians $F(i) = \frac{\sum n_i - 0,3}{N + 0,4}$ (dans notre cas $N = 9 \leq 20$) et on trace la courbe de Weibull :

N°	TBF(h)	n	$\sum n_i$	F(i)	F(i) %
1	192	01	01	0,0744	7,44
2	912	01	02	0,1808	18,08
3	960	01	03	0,2872	28,72
4	1104	01	04	0,3936	39,36
5	3408	01	05	0,5	50
6	5064	01	06	0,6063	60,63
7	5304	01	07	0,7127	71,27
8	5952	01	08	0,8191	81,91
9	9840	01	09	0,9255	92,55

FIG. 4.3 : Fonction de repartition réelle

A partir de Weibull ou logiciel Statistics,

On déduit les paramètres: β, η et γ .

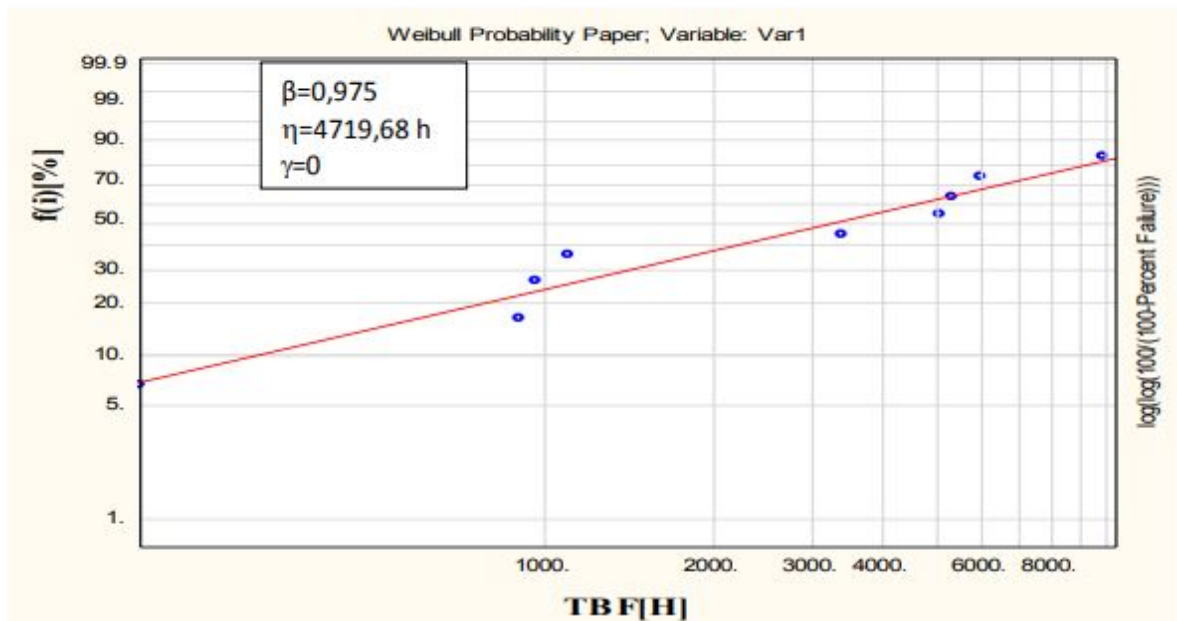


FIG. 4.4 : Fonction de repartition réelle

4.4.1 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 $Fe(ti)$ et la fonction réelle $F(t)$ et prendre le maximum en valeur absolue $D_{n,max}$.

Cette valeur est comparée avec $D_{n,\alpha}$ Qui est donnée par la table de Kolmogorov Smirnov (voir annexe1). Si $D_{n,max} > D_{n,\alpha}$ On refuse l'hypothèse.

N°	TBF	F (i)	F(t)	$D_{N_{max}} = F(i) - F(t) $
01	192	0,0744	0.0431	0.0313
02	912	0,1808	0.1823	0.0015
03	960	0,2872	0.1907	0.0965
04	1104	0,3936	0.2153	0.1783
05	3408	0,5	0.5171	0.0171
06	5064	0,6063	0.6573	0.051
07	5304	0,7127	0.6738	0.0389
08	5952	0,8191	0.7145	0.1046
09	9840	0,9255	0.8708	0.0547

TAB. 4.2 : Test de KOLMOGOROV SMIRNOV

D'après la table 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 $D_{N_{max}} = |F(i) - F(t)|$.

$D_{N_{max}} = 0.1783$ tandis que $D_{N,\alpha} = D_{9,0.20} = 0,3399$

4.4.2 Exploitation les paramètres de WEIBULL

4.4.2.1 Le MTBF

Le tableau de MTBF donne $A= 1,0234$, $B=1,07769$ (voir annexe tab.2).

$$\text{MTBF}=A. \eta + \gamma.$$

$$\text{MTBF}=1,0234 \times 4719,68 + 0$$

$$\text{MTBF} = 4830.124 \text{ h.}$$

4.4.2.2 La densité de probabilité en fonction de MTBF

$$f(t=\text{MTBF}) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \times e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} = 0.000074 = 0.0074 \%$$

4.4.2.3 La fonction de réparation en fonction de MTBF

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

$$F(t=\text{MTBF}) = 1 - e^{-\left(\frac{4830.12}{4719,680}\right)^{0,975}} = 0.64 = 64\%$$

4.4.2.4 La fiabilité en fonction de MTBF

$$R(t=\text{MTBF}) = 1 - F(t= \text{MTBF}) = 1-0,64 = 0,36$$

$$R(\text{MTBF}) = 36 \%$$

On remarque que la fiabilité de la turbine est faible.

4.4.2.5 Le taux de défaillance en fonction de MTBF

4.4.2.6 Calcul du temps souhaitable pour une intervention systématique

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

$$\lambda(t=MTBF) = \frac{0,975}{4719,68} \left(\frac{4830,12}{4719,68} \right)^{0,975-1} = 0,0002064 \text{ panne/heure}$$

4.5 Étude du modèle de weibull

4.5.1 La fonction de la densité de probabilité

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

TBF(h)	192	912	960	1104	3408	5064	5304	5952	9840
$\lambda(t) \times 10^{-3}$	0,2237	0,2152	0,2149	0,2142	0,2082	0,2062	0,2059	0,2053	0,2028

TAB. 4.3 : Calcul de la fonction de la densité de probabilité

4.5.1.1 Courbe de la densité de probabilité f(t)

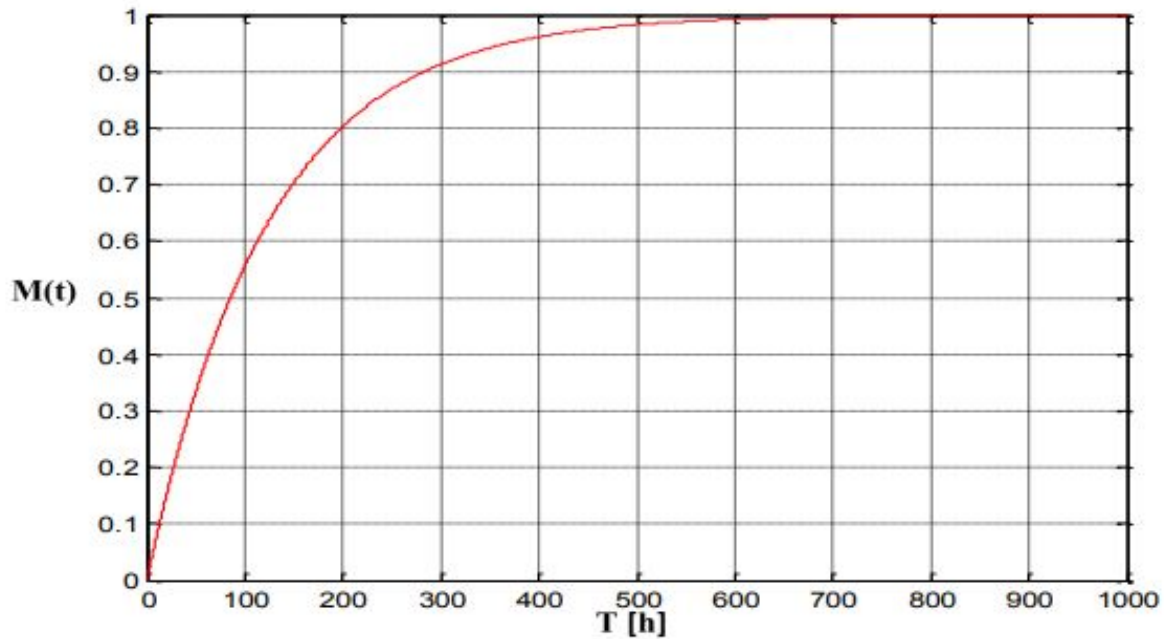


FIG. 4.5 : Courbe de la densité de probabilité

4.5.1.2 Analyse de la courbe

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

4.5.2 Fonction de réparation $F(t)$

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

TBF(h)	192	912	960	1104	3408	5064	5304	5952	9840
F(t)	0,0431	0.1823	0,1907	0,2153	0,5171	0,6573	0,6738	0,7145	0,8708

TAB. 4.4 : Fonction de réparation $F(t)$

4.5.2.1 Courbe de la fonction de réparation $f(t)$

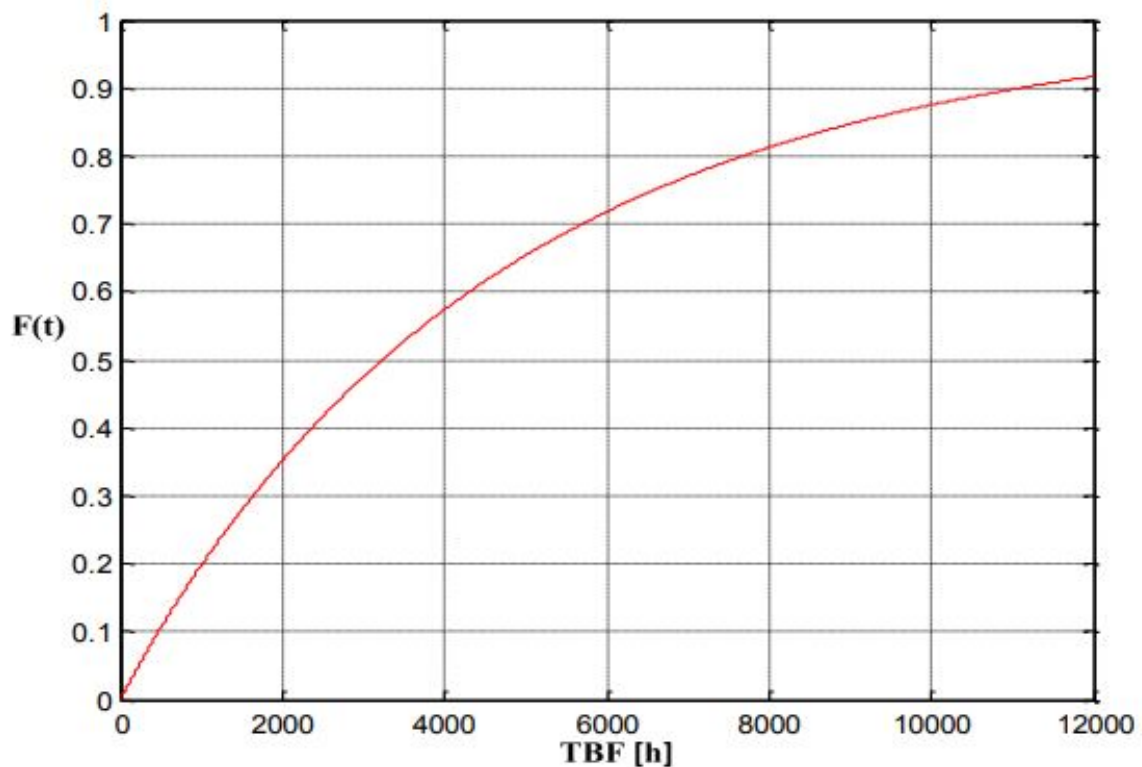


FIG. 4.6 : Courbe de la fonction de réparation $f(t)$

4.5.2.2 Analyse de la courbe

La fonction de défaillance croissant en fonction de temps, et pour $t=MTBF$,
 $F(MTBF)=0,64=64$

4.6 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 $t=MTBF$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-y}{\eta}\right)^\beta} \quad R(t=MTBF) = 0,36$$

(4.1)

TBF(h)	192	912	960	1104	3408	5064	5304	5952	9840
R(t)	0,9568	0,8176	0,8092	0,7846	0,4828	0,3426	0,3261	0,2854	0,1291

TAB. 4.5 : Calcul de la fiabilité

4.6.1 Courbe de la fiabilité

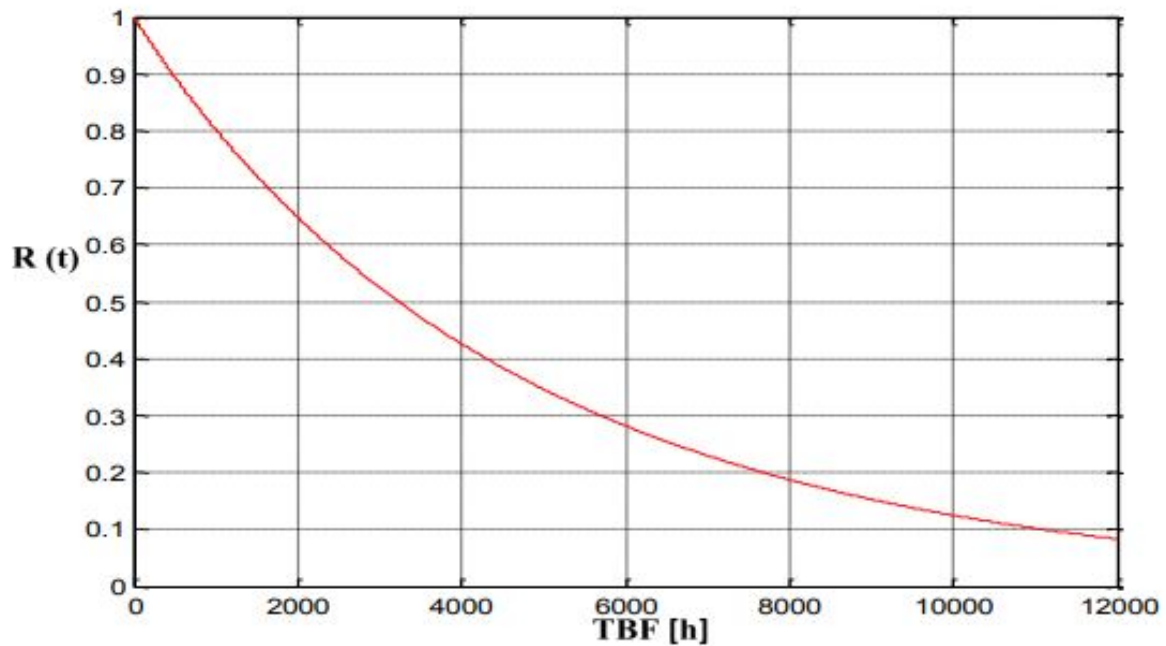


FIG. 4.7 : Courbe de la fonction de la fiabilité

4.6.2 Analyse de la courbe de fiabilité

Le graphe décroissant en fonction de temps ce qui fait expliquer par le phénomène de dégradation comme par exemple décrochement. 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.

4.7 Le taux de défaillance

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

TBF(h)	192	912	960	1104	3408	5064	5304	5952	9840
$\lambda(t) \times 10^3$	0,2237	0,2152	0,2149	0,2142	0,2082	0,2062	0,2059	0,2053	0,2028

TAB. 4.6 : Calcul du taux de défaillance

4.7.1 Courbe du taux de défaillance

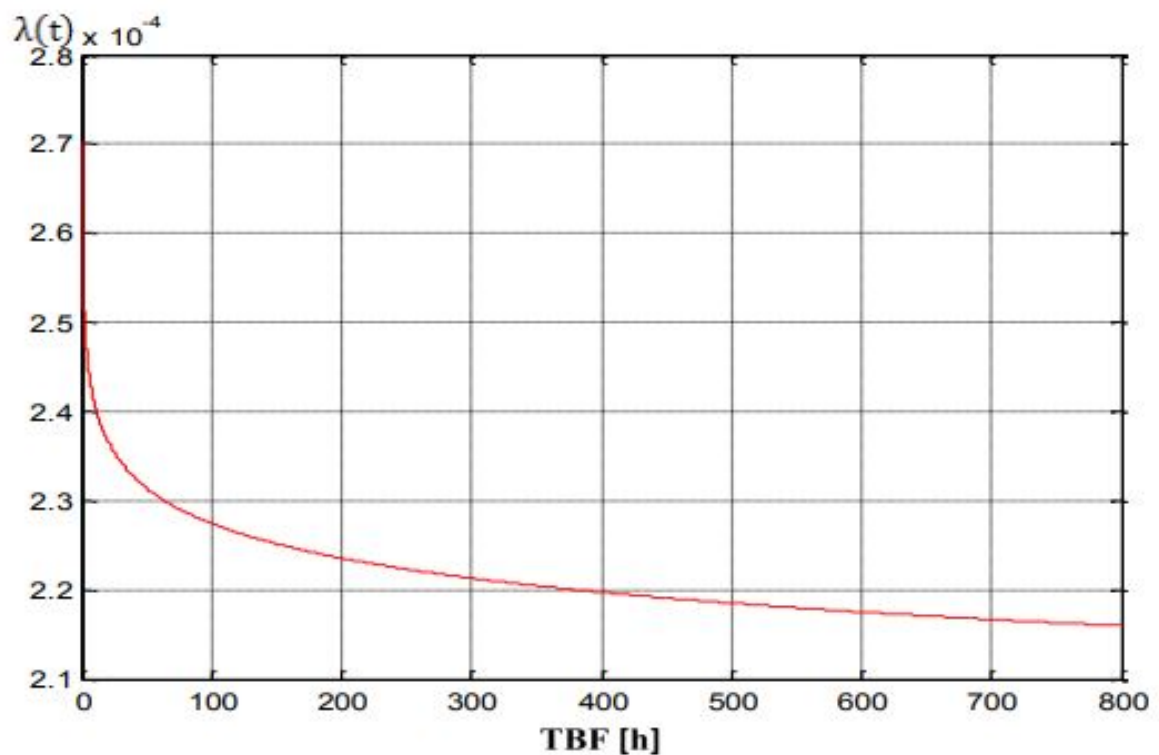


FIG. 4.8 : Courbe du taux de défaillance

4.7.2 Analyse de la courbe du taux de défaillance

Le taux de défaillance est décroissant en fonction de temps. Cette diminution est considérée normale c.-à-d. né pas rapide.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre on a tenté d'exploiter l'historique de panne de la turbine type DR990 implanté à l'unité de traitement de gaz , en classant les pannes selon leurs causes.

Les paramètres de Weibull ont été calculés puis testés par le test de KOLMOGOROV SMIRNOV (détermine l'écart entre la fonction théorique et la fonction réel). La validation des lois de fiabilité nous donne que 36 % de fiabilité (faible fiabilité).

Conclusion générale

La turbine à gaz a connu ces dernières années un développement considérable dans de nombreuses applications industrielles, et en particulier dans le domaine du transport du pétrole, où conçue avec deux lignes d'arbres et accouplée à une pompe centrifuge, elle offre une grande souplesse d'exploitation.

L'évolution de la machine et son succès ont été conditionnés par l'amélioration des performances techniques des turbines. La maintenance des biens de production repose en grande partie sur l'état des mécanismes nécessaires au fonctionnement, personne n'ignore l'importance d'un entretien régulier pour la disponibilité des machines, mais lorsqu'il s'agit d'assurer la sécurité des biens, des personnes et de l'environnement, l'entretien s'avère notoirement insuffisant et nécessite des approches plus fines développées dans les stratégies de maintenance. La maintenance optimale des machines tournantes en fonctionnement a une importance vitale pour assurer une production permanente et augmenter la durée de vie de ces machines.

Le but de ce travail est de connaître des généralités sur les turbines, d'étudier et d'appliquer certaines méthodes de maintenance.

Notre mémoire est structuré en quatre chapitres, suivis d'une conclusion générale.

- Dans le premier chapitre on a présenté la théorie de la turbine en générale.

- Le deuxième chapitre est réservé à l'étude théorique sur l'analyse fonctionnelle et l'AMDEC et quelque diagramme (Pareto, bête à corne) et des généralités sur la maintenance.

- Dans le troisième chapitre on a abordé les différents lois de fiabilité.

- Enfin, dans le quatrième chapitre on a élaboré l'estimation de la fiabilité d'une turbine
dr 990

Annexe 1

Tableau de la 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
>35	$\frac{1,07}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{N}}$	$\frac{0,188}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{N}}$

Annexe 2

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

Bibliographie

M. KADI, Etude et amélioration FMD d'une motopompe centrifuge, Mémoire de master professionnel, Université de Ouargla, (2014).

"Turbine à vapeur et à gaz", Lucien Vivier, Edition Albin Michel (1965).

"compresseurs et turbines", Energie, mines et ressources Canada

HERZALLAH ATHMANE, ETUDE THERMODYNAMIQUE, MAINTENANCE ET FIABILITE D'UNE TURBINE A GAZ MS 5002, Mémoire master, (2007)

technique de l'ingénieur, Maintenance des turbines à vapeur, Henri-Pierre RAMELLA, (2002)

M. chikh, Etude thermodynamique maintenance, amélioration de la turbine a gaz 5002b, Mémoire de l'ingénieur, Université de BOUMERDES, (2009).

"Manuel de maintenance", NAPHTOGAZ, HMD, (2001).

Fiabilité, maintenance et risque, David Smith, (traduit de l'anglais par la promotion 2006 du Master MTC2M sous la direction de Daniel Gouadec).

Daniel Roux et Daniel Dupont Edmond maurel, - mars 1977.

BOUHAM Abdallah « Amélioration des performances des turbine à gaz utilisées dans l'industrie des hydrocarbures par l'injection de vapeur d'eau à l'amont de la chambre de Combustion. » Thèse de doctorat, université M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES 2009.

GE Oil and Gas, Heavy Duty Gas Turbine, Introduand General Overview 2013.

François Monchy 345 « Maintenance méthode et organisation » - Paris- 2003

« Description de la turbine à gaz MS5002C » Centre de développement et d'application des techniques pétrolières et gazières NAPHTOGAZ – HMD – 2001.

Manuel de maintenance de la turbine à gaz MS 5002C. Nuovo pignone – Florence 1999.