

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
N° : ER-06



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTROMECHANIQUE
OPTION : MAINTENANCE DES EQUIPEMENTS INDUSTRIELS

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par:

Moussa OUMHANI
Soufyane MECHTA

Intitulé

**Amélioration du rendement d'un système
électromécanique par l'utilisation des méthodes de
maintenance industrielle**

Soutenu devant le jury composé de:

<i>Dr Mabrouk DEFDAF</i>	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
<i>Dr Zine GHEMARI</i>	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
<i>Dr Samir MABREK</i>	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

Année universitaire : 2019/ 2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ

Nous dédions ce mémoire à nos parents qui les ont soutenus tout au long de nos études, parfois nous sentons à l'aise dans les moments difficiles, et sans qui nous ne pourrions pas faire le travail. Nous dédions ce travail à nos frères et sœurs. Pour toutes nos familles. À tous nos amis sincères. À toute la classe de 2020. Notre dévouement s'adresse également à ceux qui ont participé directement ou indirectement à l'aboutissement de nos efforts

Remerciement

Nous voulons exprimer par ces quelques lignes de remerciement notre gratitude envers tous ceux en qui par leur présence, leur soutien, leur disponibilité et leurs conseils, nous avons eu courage d'accomplir ce projet.

Nous commençons par un remerciement de Monsieur GHEMARI Zine qui nous a fait l'honneur d'être notre encadreur.

Nous le remercions profondément pour son encouragement continue et aussi d'être toujours là pour nous écouter, nous aider et nous guider à retrouver le bon chemin par sa sagesse et ses précieux conseils,

Ainsi que son soutien moral et sa preuve de compréhension, ce qui nous a donné la force et le courage d'accomplir ce projet.

Nous tenons à remercier également toute l'équipe de la faculté de la technologie, et plus particulièrement, le département de génie électrique.

En fin, nous ne pouvons achever ce mémoire sans exprimer notre gratitude à tous les professeurs de département de génie électrique, pour leur dévouement et leur assistance tout au long de nos études universitaires.

Résumé :

Pour garantir un niveau optimal de production, les industries doivent établir une politique de maintenance efficace dans le domaine industriel.

Dans notre mémoire, les TBF de la machine Aléseuse Fraiseuse sont extraits, puis la fonction de répartition réelle et théorique sont calculées ont pour but de choisir la méthode adéquate pour évaluer la fiabilité de cette machine, d'une part et calculer la disponibilité et la maintenabilité d'une autre part. Pour progresser la fiabilité à une valeur de 70%, nous avons suggéré d'augmenter la moyenne de temps de bon fonctionnement de la machine et minimiser leur temps d'arrêt par l'application d'un plan de maintenance préventive systématique additionnel et l'utilisation de la technique d'analyse vibratoire.

Mots clés : Maintenance, Fiabilité, maintenabilité, disponibilité.

ملخص

في المجال الصناعي يجب على الشركات وضع سياسة صناعية فعالة من أجل ضمان مستوى الأمثل للإنتاج. في مذكرتنا، يتم استخراج TBF لآلة Aléseuse Fraiseuse ، ثم يتم حساب دالة التوزيع الحقيقي والنظري من أجل اختيار الطريقة المناسبة لتقييم موثوقية هذه الآلة ، من ناحية ولحساب التوافر و قابلية الصيانة من ناحية أخرى. لتحسين الموثوقية إلى قيمة 70٪، اقترحنا زيادة متوسط وقت تشغيل الماكينة وتقليل وقت تعطلها من خلال تطبيق خطة صيانة وقائية منهجية إضافية واستخدام تقنية تحليل الاهتزاز.

الكلمات المفتاحية: الصيانة، الموثوقية، إمكانية الصيانة، التوفر.

Summary:

To guarantee an optimum level of production, industries must establish an effective maintenance policy in the industrial field.

In our brief, the TBF of the Aléseuse Fraiseuse Machine are extracted, then the real and theoretical distribution function is calculated with the aim of choosing the appropriate method to evaluate the reliability of this machine, on the one hand and calculate availability and maintainability on the other hand. To increase reliability to 70%, We suggested that the average time for the machine to function properly be increased and their downtime minimized by the application of an additional systematic preventive maintenance plan and the use of the vibration analysis technique.

Keywords: Maintenance, Reliability, maintainability, availability.

Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	vi
Acronymes, Sigles et Abréviations	vii
Introduction générale	2

Chapitre I Généralité sur la maintenance

I.1. Introduction	5
I.2. Définition de la maintenance.....	5
I.3. Rôle de la maintenance.....	5
I.4. Les types de maintenance.....	6
I.4.1. La maintenance corrective.....	7
I.4.2. La maintenance préventive.....	7
I.4.2.1. La maintenance préventive systématique	7
I.4.2.2. La maintenance préventive conditionnelle	7
I.4.2.3. La maintenance prédictive ou prévisionnelle	7
I.5. Les opérations de maintenance.....	8
I.5.1. Les opérations de maintenance corrective.....	8
I.5.1.1. Le dépannage	8
I.5.1.2. La réparation	8
I.5.2. Les opérations de maintenance préventive.....	8
I.5.2.1. Les inspections.....	8
I.5.2.2. Les visites.....	8
I.5.2.3. Les contrôles	9
I.5.3. Autres opérations.....	9
I.5.3.1. Révision	9
I.5.3.2. Les échanges standards	9
I.6. Les niveaux de maintenance.....	9
I.6.1. 1^{er} Niveau de maintenance.....	9
I.6.2. 2^{ème} Niveaux de maintenance.....	10
I.6.3. 3^{ème} Niveaux de maintenance	10
I.6.4. 4^{ème} Niveaux de maintenance	10

I.5.5. 5^{ème} Niveaux de maintenance.....	10
I.7. L'intérêt de maintenance	11
I.8. La stratégie de maintenance (<i>normes NF EN 13306 & FD X 60-000</i>)	12
I.9. Objectif de la maintenance	12
I.10. Evolution de la maintenance	13
I.11. L'importance de la maintenance	14
I.12. L'environnement de la maintenance	14
I.13. La mise en place de la maintenance	14
I.14. Les méthodes d'analyse de défaillance	15
I.14.1. Méthode cause-effet ou Ishikawa.....	15
I.14.1.1. Définition	15
I.14.1.2. LES 5M.....	15
I.14.1.3. Etapes de construction d'un diagramme d'Ishikawa	17
I.14.2. Méthode ABC (Diagramme Pareto).....	17
I.14.2.1. Diagramme de Pareto.....	17
I.14.2.2. Définition de la méthode ABC	17
I.14.2.3. But de la méthode ABC	18
I.15. Conclusion.....	19

Chapitre II Lois de calculs de fiabilité

II.1. Introduction.....	21
II.2. Fiabilité	21
II.2.1. Notion de fiabilité d'un système	21
II.2.2. Définition	21
II.2.3. Objectifs de la fiabilité.....	21
II.2.4. Méthodes mathématiques.....	22
II.2.4.1. Densité de probabilité $f(t)$	22
II.2.4.2. Fonction de répartition $F(t)$	22
II.2.4.3. Taux de défaillance $\lambda(t)$	23
II.2.4.4. Fiabilité $R(t)$	23
II.2.4.5. Fiabilité des systèmes complexes	23
II.2.4.6. MTBF	25
II.2.4.7. Le taux de défaillance $\lambda(t)$ en fonction du temps t	26

II.2.4.8. Les principales lois utilisées	26
II.2.4.8.1. Loi exponentielle.....	27
II.2.4.8.2. Loi de Weibull.....	27
II.2.4.8.3. Loi normale.....	28
II.2.4.8.4. Loi log-normale.....	28
II.2.4.8.5. Loi Gamma.....	29
II.2.4.8.6. Loi Bêta.....	29
II.2.4.8.7. Loi uniforme.....	29
II.2.4.8.8. La loi de Birnbaum-Saunders.....	29
II.2.4.8.9. Relation entre la maintenance et la fiabilité	30
II.2.4.8.10. MTTR.....	31
II.2.5. Les tests d'ajustement	31
II.2.5.1. Tests Kolmogorov-Smirnov	31
II.2.5.2. Test Khi-Deux	32
II.3. Maintenabilité	33
II.3.1. Définition	33
II.3.2. Temps Techniques de Réparation TTR.....	33
II.3.3. Amélioration de la maintenabilité.....	34
II.3.4. Les critères de maintenabilité.....	34
II.3.5. Les indicateurs de maintenabilité.....	35
II.3.6. Expressions mathématiques	35
II.4. La disponibilité	36
II.4.1. Définition	36
II.4.2. Quantification de la disponibilité :.....	36
II.4.3. Différents niveaux de la disponibilité	36
II.4.3.1. Disponibilité intrinsèque théorique	36
II.4.3.2. Disponibilité moyenne.....	36
II.4.3.3. Disponibilité opérationnelle	37
II.4.3.4. Disponibilité asymptotique.....	37
II.4.3.5. Disponibilité instantanée	37
II.5. Relation entre fiabilité, maintenabilité et disponibilité.....	37

II.6. Conclusion	38
Chapitre III Calcul et amélioration de la fiabilité du système choisi	
III.1. Introduction.....	40
III.2. Historique des pannes	40
III.3. L'analyse FMD.....	42
III.3.1. La fiabilité.....	42
III.3.1.1. Test (KOLMOGOROV SMIRNOV).....	43
III.3.1.2. Calculs de la fiabilité, de la densité probabilité et du taux de défaillance	46
III.3.1.3. Calcul de R (MTBF)	48
III.3.1.4. Calcul de F(MTBF).....	48
III.3.1.5. La densité de défaillance f (MTBF).....	49
III.3.1.6. Calcul de λ (MTBF)	49
III.3.2. La maintenabilité	49
III.3.3. La disponibilité	51
III.3.3.1. Disponibilité intrinsèque théorique	51
III.3.3.2. La disponibilité instantanée.....	51
III.4. Amélioration de la fiabilité par la Méthodes d'analyse de défaillances.....	54
III.4.1. L'application pratique de la méthode d'analyse de défaillances ABC.....	54
III.4.2. La courbe ABC	54
III.4.2.1. Interprétation des résultats	56
III.5. Conclusion	57
Conclusion Générale.....	59
Références bibliographiques.....	61
Annexe A : Introduction to EasyFit 5.6.....	A-1
Avantages d'EasyFit :.....	A-2
Annexe B : Table d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov.....	B-2

Liste des figures

Figure I.1	Organigramme de différentes méthodes de la maintenance.....	6
Figure I.2	Objectif de la maintenance.....	13
Figure I.3	Evolution de la maintenance depuis 1940.....	13
Figure I.4	L'assurance produit.....	14
Figure I.5	Diagramme d'Ishikawa	16
Figure I.6	Diagramme de Pareto ou courbe ABC.....	18
Figure II.1	Courbe de fiabilité et fonction de répartition.....	22
Figure II.2	Série système.....	24
Figure II.3	Parallèle système.....	24
Figure II.4	n parmi m redondance.....	24
Figure II.5	Passive redondance.....	25
Figure II.6	Baignoire en courbe.....	26
Figure II.7	l'impacte de la maintenance sur la fiabilité des équipements.....	30
Figure II.8	Relation entre les paramètres FMD.....	38
Figure III.1	Fonction de répartition F(t).....	45
Figure III.2	La fonction de fiabilité R(t).....	46
Figure III.3	Densité de probabilité F(t).....	47
Figure III.4	Taux de défaillance lambda(t).....	48
Figure III.5	La courbe de maintenabilité	51
Figure III.6	La courbe de disponibilité instantanée.....	53
Figure III.7	La courbe ABC.....	56
Figure A	: Interface de logiciel EasyFit	A-1

Liste des tableaux

Tableau I.1 Les ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance.....	11
Tableau II.1 Les indicateurs de maintenabilité.....	35
Tableau III.1 Historique des pannes, de la machine aléseuse fraiseuse.....	41
Tableau III.2 Calcule la fonction de répartition.....	43
Tableau III.3 Les paramètres de calcul de fiabilité.....	43
Tableau III.4 Estimation de la fiabilité et fonction de répartition.....	44
Tableau III.5 Calculs de la fiabilité, du temps de défaillance et de la densité de probabilité.....	47
Tableau III.6 Le calcul de la maintenabilité	50
Tableau III.7 Tableau de disponibilité instantané.....	53
Tableau III.8 Les données pour tracer la courbe ABC.....	55
Tableau B : Table d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov	B-1

Acronymes, Sigles et Abréviations

ABC :	Méthode de Pareto (priorité d'actions)
AFNOR :	Association française de normalisation
MTBF :	Mean time Between failure (TBF : durée de bon fonctionnement) temps moyen entre deux défaillances successives
ISHIKAWA	Le diagramme de causes et effets, ou diagramme en arêtes de poisson ou encore 5M (Matériel, Méthode, Main_doevre , Milieu),est un outil développé par Kaoru Ishikawa en 1962 et servant dans la gestion de la qualité
MTTR :	Mean time to repair (TTR: temps technique de reparation)
FMD:	Fiabilité, maintenabilité, disponibilité
Pareto:	Méthode graphique, son nom doit à l'économiste italien vilfredo pareto
M(t) :	Maintenabilité
MTL :	Moyen des temps logistiques
TCI :	Temps cumulé d'immobilisation
TCBF :	Temps cumulé de bon fonctionnement
R(t) :	Fiabilité
F(t) :	Probabilité de défaillance
D(t) :	Disponibilité
$\lambda(t)$:	Taux de défaillance
$\mu(t)$	Taux de réparation

Introduction générale

Introduction générale

La maintenance joue un rôle très important dans le domaine industriel, à partir de leur influence sur la fiabilité des systèmes électromécaniques, cette dernière peut améliorer par l'application d'une stratégie basée sur les méthodes de maintenance telles que la maintenance préventive systématique et la maintenance préventive conditionnelle.

Toujours, il existe des activités de maintenance au sens de dépannage d'un système électromécanique. Mais ces activités étaient au départ peu ou pas formalisées : elles n'étaient pas nécessairement assurées par du personnel spécialisé, ni encadrées par des méthodes spécifiques. De plus, elles consistaient à réparer un équipement une fois que celui-ci était défaillant, mais n'intégraient que peu la notion de "préventif", c'est-à-dire des interventions visant à prévenir la panne.

La notion formalisée de "maintenance" est relativement récente. Elle est apparue avec l'automatisation des systèmes de production, les enjeux économiques et industriels croissants, les réglementations strictes pour la protection de l'individu et de l'environnement.

La fonction de maintenance ne peut se réduire à la seule activité d'entretenir un parc de machine mais a vocation à intervenir dans tout le cycle de l'exploitation du système (choix et conception du matériel, mise en service, détermination des plans de maintenance, organisation et logistique des activités de maintenance, suivi de l'évolution du système, etc.) [3].

Notre travail est basé sur le choix d'une machine importante dans l'entreprise MEI (la machine Aléseuse Fraiseuse) et l'amélioration de la fiabilité de cette machine par une proposition d'un ensemble des solutions concernant les éléments le plus tombe en panne et par suggestion d'un plan de maintenance préventif additionnel. Pour atteindre ces objectifs, on segmente notre travail en trois chapitres.

Le premier chapitre présente une mise en valeur de la maintenance comme impérative nécessaire à une meilleure garantie de la disponibilité des équipements toujours en faveur d'un meilleur rendement de la production et de l'économie. Quelques définitions concernant la maintenance corrective et la maintenance préventive.

Le deuxième chapitre est consacré à étudier la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité et leurs lois de calculs.

Le troisième chapitre est la partie spéciale de notre mémoire où on va calculer puis améliorer la fiabilité de la machine choisie par une proposition des solutions de défaillances et par une suggestion d'un plan de maintenance préventif systématique additionnel concernant les éléments les plus défaillants.

Chapitre I. Généralité sur la maintenance

I.1. Introduction

Longtemps vue comme un mal nécessaire, la maintenance est devenue une réelle préoccupation dans les entreprises. Elle s'est affirmée comme un véritable enjeu compétitif, tant sur l'assurance des performances de disponibilité des matériels existants qu'en termes de sécurité, de qualité et de coûts, par exemple. On note aussi la prise en compte de nouvelles préoccupations telles que les aspects environnementaux par le biais de la réduction des émissions de déchets polluants ou encore le recyclage des systèmes en fin de vie. Aujourd'hui, elle est perçue comme un processus industriel à part entière lorsqu'elle n'est pas identifiée comme une des activités principales de l'exploitation industrielle. L'objectif de ce chapitre est de mettre en relief la notion de maintenance, son importance et les différentes pratiques existantes selon la taille et la productivité de l'entreprise.[2]

I.2. Définition de la maintenance

Selon l'AFNOR par la norme NF X 60-010, la maintenance se définit comme étant : ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. Bien maintenir, c'est assurer l'ensemble de ces opérations au coût optimal. [3]

I.3. Rôle de la maintenance

Le service maintenance doit mettre en œuvre la politique de maintenance définie par la direction de l'entreprise ; cette politique devant permettre d'atteindre le rendement maximal des systèmes de production. Cependant, tous les équipements n'ont pas le même degré d'importance d'un point de vue maintenance. Le service devra donc, dans le cadre de la politique globale, définir les stratégies les mieux adaptées aux diverses situations. La fonction maintenance sera alors amenée à établir des prévisions ciblées [3] :

La fonction maintenance

- **Prévisions à long terme:** elles concernent les investissements lourds ou les travaux durables. Ce sont des prévisions qui sont le plus souvent dictées par la politique globale de l'entreprise.
- **Prévisions à moyen terme:** la maintenance doit se faire la plus discrète possible dans le planning de charge de la production. Il lui est donc nécessaire d'anticiper, autant que faire se peut, ses interventions en fonction des programmes de production. La production doit elle aussi prendre en compte les impératifs de suivi des matériels.

- **Prévisions à courts termes:** elles peuvent être de l'ordre de la semaine, de la journée, voire de quelques heures. Même dans ce cas, avec le souci de perturber le moins possible la production, les interventions devront elles aussi avoir subi un minimum de préparation. Nous nous intéressons dans la démarche de cette thèse de la maintenance en moyens et long terme.

I.4. Les types de maintenance

Généralement, la maintenance est divisée en deux types :

- La maintenance corrective
- La maintenance préventive

La figure I.1 illustre l'organigramme des différentes méthodes de la maintenance :

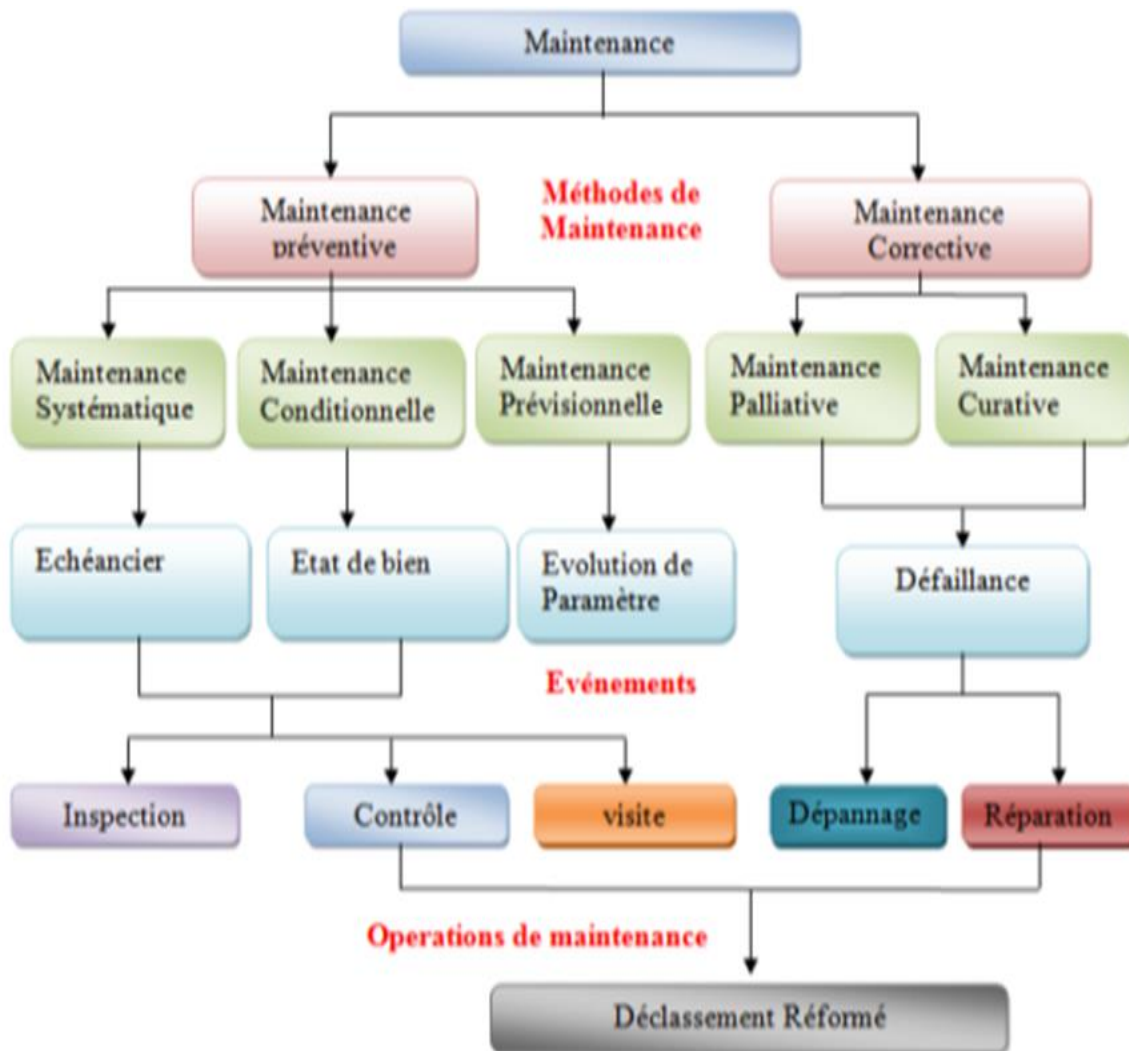


Figure I.1 : Organigramme de différentes méthodes de la maintenance. [1]

I.4.1. La maintenance corrective

La maintenance corrective est définie par la norme AFNOR NF X 60 010 comme une maintenance effectuée après défaillance, où l'on distingue deux types d'intervention : [4]

Palliative (dépannage) qui est basé sur l'opération de dépannage, parce que la défaillance est partielle.

Curative (réparation) qui est basé sur l'opération de réparation parce que la défaillance est totale

I.4.2. La maintenance préventive

D'après la norme AFNOR (X-60-010), on peut définir la maintenance préventive comme une maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu.

On distingue deux méthodes de cette maintenance :

I.4.2.1. La maintenance préventive systématique

Selon la norme AFNOR X-60-010, on définit la maintenance systématique comme étant une maintenance préventive effectuée suivant un échéancier établi, suivant le temps ou le nombre d'unité d'usage.

I.4.2.2. La maintenance préventive conditionnelle

Selon la norme AFNOR X-60-010, on définit la maintenance conditionnelle comme étant une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé révélateur de l'état du bien [2] et la maintenance préventive conditionnelle se caractérise par la mise en évidence de la partie faible de l'équipement.

- ✓ Mesure des vibrations des bruits.
- ✓ Mesure de température.
- ✓ Mesure de pression dans les différents organes.
- ✓ Analyse des vibrations : Il se fait généralement dans les ateliers de réparation situés à la base industrielle.
- ✓ Analyse des huiles. [5]

I.4.2.3. La maintenance prédictive ou prévisionnelle

C'est un type de maintenance conditionnelle permettant de réajuster les prévisions d'opérations de maintenance à effectuer, en estimant la tendance évolutive du dysfonctionnement éventuel détecté sur un appareil et le temps pendant lequel il est possible de continuer à l'utiliser avant la panne. Ces estimations se font à partir des analyses

périodiques de l'état de chaque équipement obtenue par les méthodes de la maintenance conditionnelle et l'utilisation de modèles d'usure. [6]

I.5. Les opérations de maintenance

I.5.1. Les opérations de maintenance corrective

I.5.1.1. Le dépannage

Action sur un bien en panne, en vue de le remettre en état de fonctionnement. Compte tenu de l'objectif, une action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires (maintenance palliative) avec des conditions de réalisation hors règles de procédures, de coûts et de qualité, et dans ce cas sera suivie de la réparation.

Le dépannage n'a pas de conditions d'applications particulières. La connaissance du comportement du matériel et des modes de dégradation sont à la base d'un bon diagnostic et permettent souvent de gagner du temps. Souvent, les opérations de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses. De ce fait, les services de maintenance soucieux d'abaisser leurs dépenses tentent d'organiser les actions de dépannage. Certains indicateurs de maintenance (pour en mesurer son efficacité) prennent en compte le problème du dépannage. Ainsi, le dépannage peut être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnant en continu dont les impératifs de production interdisent toute visite ou intervention à l'arrêt.

I.5.1.2. La réparation

Intervention définitive et limitée de maintenance corrective après panne ou défaillance. L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite d'un incident ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.

I.5.2. Les opérations de maintenance préventive

I.5.2.1. Les inspections

Activités de surveillance consistant à relever périodiquement des anomalies et exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de l'outil de production ou des équipements.

I.5.2.2. Les visites

Opérations de surveillance qui, dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité déterminée. Ces interventions correspondent à une liste

d'opérations définies préalablement qui peuvent entraîner des démontages d'organes et une immobilisation du matériel. Une visite peut entraîner une action de maintenance corrective.

I.5.2.3. Les contrôles

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

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

I.5.3. Autres opérations

I.5.3.1. Révision

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

Il faut distinguer suivant l'étendue des opérations à effectuer les révisions partielles et les révisions générales. Dans les 2 cas, cette opération nécessite la dépose de différents sous-ensembles. Le terme révision ne doit en aucun cas être confondu avec les termes visites, contrôles, inspections. Les 2 types d'opérations définis (révision générale ou partielle) relèvent du 4ème niveau de maintenance.

I.5.3.2. Les échanges standards

Reprise d'une pièce ou d'un organe ou d'un sous-ensemble usagé, et vente au même client d'une pièce ou d'un organe ou d'un sous-ensemble identique, neuf ou remis en état conformément aux spécification du constructeur, moyennant le paiement d'une soulte dont le montant est déterminé d'après le coût de remise en état. Soulte : somme d'argent qui, dans un échange ou dans un partage, compense l'inégalité de valeur des biens échangés.[7]

I.6. Les niveaux de maintenance

Les opérations à réaliser sont classées, selon leur complexité, en cinq niveaux. Les niveaux prix en considération sont ceux de la norme NF X-60-010. [8]

I.6.1. 1^{er} Niveau de maintenance

Actions simples nécessaires à l'exploitation et réalisées sur des éléments facilement accessibles en toute sécurité à l'aide d'équipement de soutien intégré au bien. Ce type

d'opération peut être effectué par l'utilisateur du bien avec, le cas échéant, les équipements de soutien intégrés au bien et à l'aide des instructions d'utilisation.

I.6.2. 2^{ème} Niveaux de maintenance

Actions qui nécessitent des procédures simples et des équipements de soutien (intégrés au bien ou extérieurs) d'utilisation ou de mise en oeuvre simple. Ce type d'actions de maintenance est effectué par un personnel qualifié avec les procédures détaillées et les équipements de soutien définis dans les instructions de maintenance. Un personnel est qualifié lorsqu'il a reçu une formation lui permettant de travailler en sécurité sur un bien présentant certains risques potentiels, et est reconnu apte pour l'exécution des travaux qui lui sont confiés, compte tenu de ses connaissances et de ses aptitudes

I.6.3. 3^{ème} Niveaux de maintenance

Opérations qui nécessitent des procédures complexes et des équipements de soutien portatifs, d'utilisation ou de mise en oeuvre complexes. Ce type d'opération de maintenance peut être effectué par un technicien qualifié, à l'aide de procédures détaillées et des équipements de soutien prévus dans les instructions de maintenance

I.6.4. 4^{ème} Niveaux de maintenance

Opérations dont les procédures impliquent la maîtrise d'une technique ou technologie particulière et la mise en oeuvre d'équipements de soutien spécialisés. Ce type d'opération de maintenance est effectué par un technicien ou une équipe spécialisée à l'aide de toutes instructions de maintenance générales ou particulières.

I.5.5. 5^{ème} Niveaux de maintenance

Opérations dont les procédures impliquent un savoir-faire, faisant appel à des techniques ou technologies particulières, des processus et des équipements de soutien industriels, Par définition, ce type d'opérations de maintenance (rénovation, reconstruction, etc.) est effectué par le constructeur ou par un service ou société spécialisée avec des équipements de soutien définis par le constructeur et donc proches de la fabrication du bien concerné [1]

Ces niveaux de maintenance font référence à la complexité des tâches à effectuer et aux ressources humaines et matérielles nécessaires à la réalisation de chacune des tâches. Cette spécification est détaillée dans le tableau 1. Le système de maintenance ainsi situé permet de préciser, de limiter et de dégager les responsabilités et les attentes envers ce système.

Cependant, ceci constitue une condition nécessaire mais malheureusement non suffisante pour réussir l'implantation d'un système de maintenance dans une entreprise. [9]

Niveaux	Personnel d'intervention	Moyens
I	Exploitant sur place.	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation.
II	Technicien habilité sur place.	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation, plus pièces de rechange trouvées à proximité sans délai.
III	Technicien spécialisé, sur place ou en local de maintenance.	Outillage prévu plus appareils de mesure, banc d'essai, de contrôle, etc.
IV	Equipe complète, polyvalente en atelier central.	Moyens proches de la fabrication par le constructeur.
V	Equipe complète, polyvalente en atelier central.	Moyens proches de la fabrication par le constructeur.

Tableau I.1 Les ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance [4]

I.7. L'intérêt de maintenance

Les intérêts de la maintenance sont :

- Diminuer les travaux urgents.
- Faciliter la gestion de la maintenance.
- Favoriser la planification des travaux.
- Rendre possible la préparation, l'ordonnancement et la gestion des stocks

- Eviter les périodes de dysfonctionnement avant panne, ainsi que les dégâts éventuels provoqués par une panne intempestive.
- Augmenter la sécurité. [8]

I.8. La stratégie de maintenance (*normes NF EN 13306 & FD X 60-000*)

"La stratégie de maintenance est une méthode de management utilisée en vue d'atteindre les objectifs de maintenance."

Les choix de stratégie de maintenance permettent d'atteindre un certain nombre d'objectifs de Maintenance :

- Développer, adapter ou mettre en place des méthodes de maintenance.
- Élaborer et optimiser les gammes de maintenance.
- Organiser les équipes de maintenance.
- Internaliser et/ou externaliser partiellement ou totalement les tâches de maintenance.
- Définir, gérer et optimiser les stocks de pièces de rechange et de consommables.
- Étudier l'impact économique (temps de retour sur investissement) de la modernisation ou de l'amélioration de l'outil de production en matière de productivité et de maintenabilité. [10]

I.9. Objectif de la maintenance

Les objectifs de la maintenance, schématisés dans la figure I.2 sont nombreux :

- Assurer la qualité et la quantité des produits fabriqués, tout en respectant les délais.
- Optimiser les actions de maintenance (exemple : réduire la fréquence des pannes).
- Contribuer à la création et au maintien de la sécurité au travail.
- Consolider la compétitivité de l'entreprise (exemple : améliorer la productivité).[2]

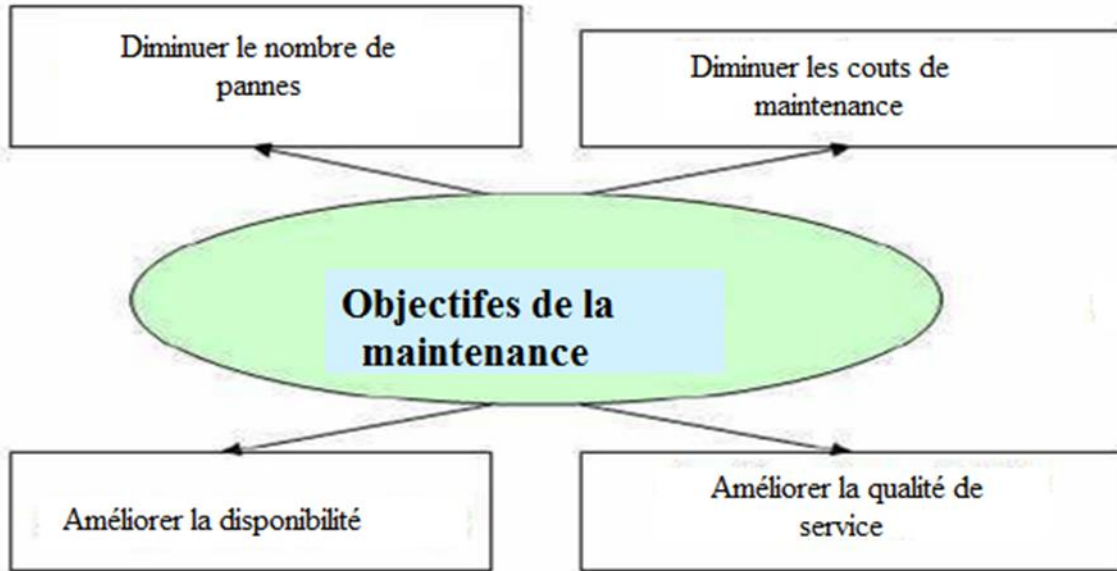


Figure I.2 : Objectif de la maintenance.

I.10. Evolution de la maintenance

Dans un contexte de concurrence économique à l'échelle planétaire, la gestion de la maintenance est loin d'être stabilisée dans un environnement où l'automatisation et le processus de fabrication deviennent de plus en plus complexes. Depuis les années 1940, l'évolution de la maintenance peut être tracée à travers trois générations (Figure I.3). [2]

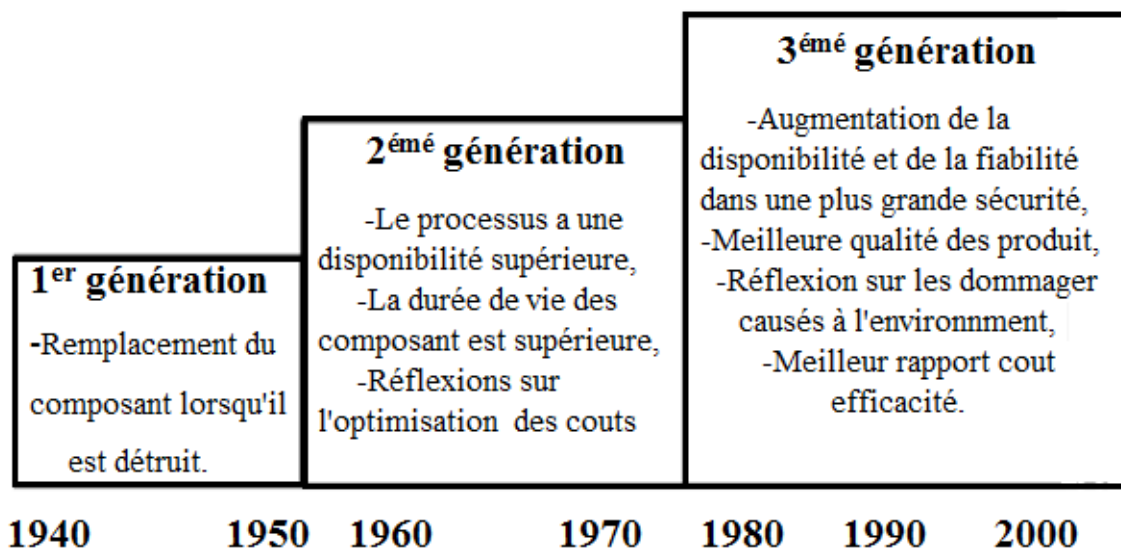


Figure I.3 : Evolution de la maintenance depuis 1940.

I.11. L'importance de la maintenance

La maintenance est importante pour l'industrie, ce qui paraît clair lors de l'occurrence des pannes provoquant des arrêts non planifiés. [2]. Par conséquent, toute interruption au cours du fonctionnement cause, comme entre autres:

- Augmentation du coût de productions,
- Diminution de la marge du profit,
- Rupture du stock,
- Retard des livraisons,
- Ajout des heures supplémentaires,
- Absence des sécurités des opérateurs.

Donc, si on planifie et on prévoit des entretiens planifiés avant l'occurrence des pannes, on pourra surmonter ces conséquences.

Pour ce faire, la partie suivante comprend des stratégies de maintenances.

I.12. L'environnement de la maintenance

La maintenance s'intègre dans le concept global de la sûreté de fonctionnement, qui lui-même s'intègre dans l'assurance Produit. [11]

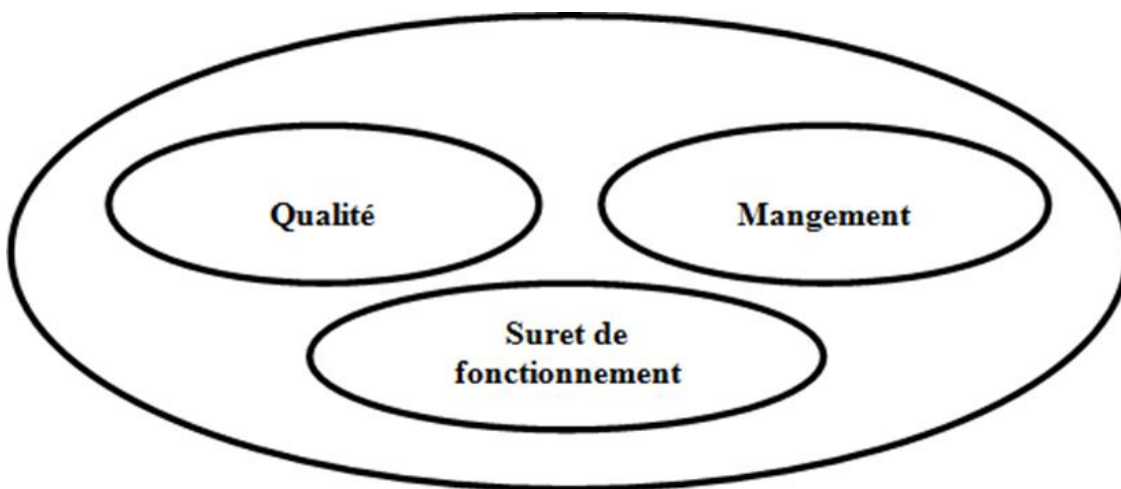


Figure I.4 : L'assurance produit.

I.13. La mise en place de la maintenance

- 1) Etude préalable pour déterminer un coût probable.
- 2) Choisir les fréquences fixes d'intervention (en rapport avec la MTBF).
- 3) Planification des tâches et mesures de sécurité.

- 4) Préparation des documents.
- 5) Exécution et rapports de visite.
- 6) Exploitation des résultats : pour l'historique et le réajustement des fréquences [1]

I.14. Les méthodes d'analyse de défaillance

Le plan de maintenance est l'une des colonnes vertébrales du service maintenance. Cette dernière est plus ou moins bien formalisée selon les services de maintenance. Peut être enregistré sur tout type de support grâce à ces différentes méthodes :

I.14.1. Méthode cause-effet ou Ishikawa

I.14.1.1. Définition

Cet outil a été créé par Ishikawa, professeur à l'Université de la TOKYO dans les années 60 et concepteur d'une méthode de management de la qualité totale. Le diagramme causes-effet est une représentation graphique du classement par familles de toutes les causes possibles pouvant influencer un processus. Ces familles de causes au nombre de 5 engendrent la non qualité dans un processus de fabrication. Leur nom commence par la lettre M d'où l'appellation 5M. Ishikawa a proposé une représentation graphique en « arête de poisson » [12]

I.14.1.2. LES 5M

Le diagramme d'Ishikawa appelé aussi la méthode des 5M, le diagramme cause à effet ou le diagramme en arête de poisson est une démarche qui permet d'identifier les causes possibles d'un problème ou un défaut (effet).

Il convient ensuite d'agir sur ces causes pour corriger le défaut en mettant en place des actions correctives appropriées.

Alors Pour tenter de diminuer ou d'anéantir un problème de qualité, il faut connaître toutes les causes qui peuvent lui donner naissance. Puis en cherchant leur poids relatif, on peut déterminer sur quelle cause agir en priorité.

IL ne garantit pas le résultat mais elle contribue (grandement) à structurer les idées et les réflexions comme, par exemple, lorsque cette méthode est utilisée lors d'un groupe de travail. Il peut être utilisé comme support de communication, de formation. Il peut être vu comme une base de connaissance. Le diagramme causes -effet n'apporte pas directement de solutions, il permet néanmoins de bien poser les questions.

Le diagramme d'Ishikawa se présente sous la forme d'un graphe en arêtes de poisson. Dans ce dernier, sont classées par catégorie les causes selon la loi des 5 M.

La méthode des 5 M permet d'orienter la réflexion vers les 5 domaines, desquels sont généralement issues les causes :

M1 - Matières : matières premières, pièces, ensembles, fournitures, identification, stockage, qualité, manutention

M2 - Matériel : Recense les causes probables ayant pour origine les supports techniques et les produits utilisés. Machines, outils, équipements, capacité, âge, nombre, maintenance

M3-Main d'œuvre : directe, indirecte, motivation, formation, absentéisme, expérience, problème de compétence, d'organisation, de management

M4 - Milieu : environnement physique, éclairage, bruit, aménagement, relations, température, climat, marché, législation

M5 – Méthodes : instructions, manuels, procédures, modes opératoires. [13]

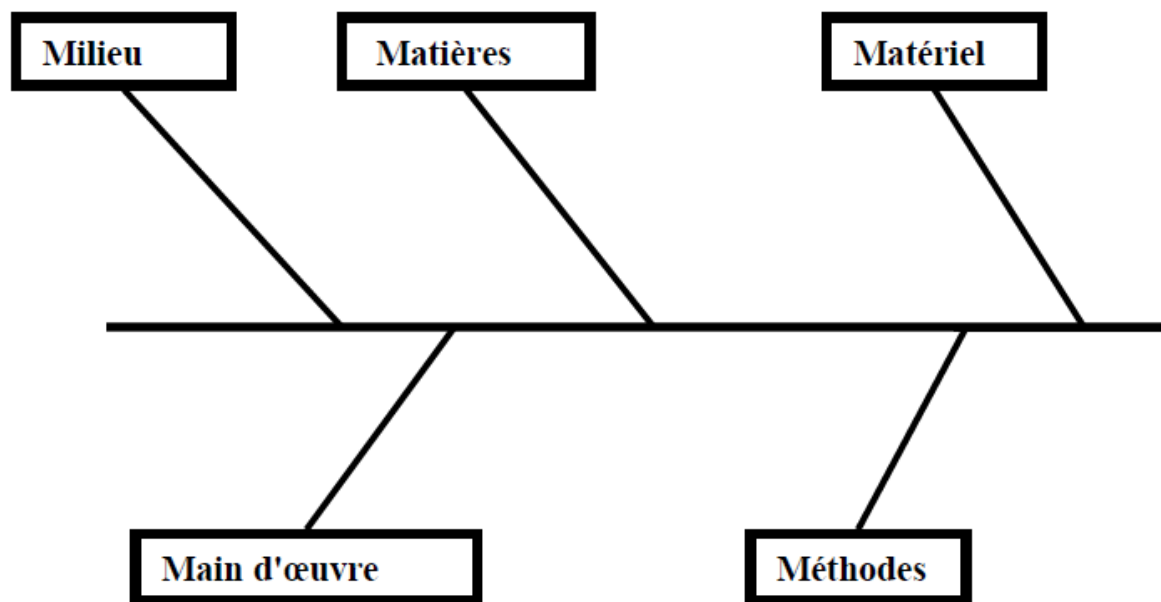


Figure I.5 : Diagramme d'Ishikawa.

Le diagramme Causes-Effet est donc l'image des causes identifiées d'un dysfonctionnement potentiel pouvant survenir sur un système. Il se veut le plus exhaustif possible en représentant toutes les causes qui peuvent avoir une influence sur la sûreté de fonctionnement. Les 5 grandes familles ou 5 facteurs primaires sont renseignés par des facteurs secondaires et parfois tertiaires ; Les différents facteurs doivent être hiérarchisés [12].

I.14.1.3. Etapes de construction d'un diagramme d'Ishikawa

La construction du diagramme d'Ishikawa est basée sur un travail de groupe. Il est élaboré en plusieurs étapes :

- 1) Décrire le problème ou la défaillance.
- 2) Déterminer les causes qui ont pu déclencher le problème. En général, on utilise soit le Brainstorming, soit la méthode des 5M.
- 3) Tracer le squelette du diagramme d'Ishikawa (sous forme d'arêtes de poisson) en y mentionnant les 5M.
- 4) Pour chaque catégorie de 5M, inscrire les causes suggérées par les membres du groupe en posant toujours la question : pourquoi telle cause produit-elle cet effet ?
- 5) Classer les causes proposées ou les hypothèses en de sous catégories.
- 6) Définir les causes premières qu'il est possible de soustraire, voire même éradiquer.
- 7) Trouver les solutions adéquates aux causes en mettant en place des actions correctives.

Toutes ces étapes permettent de décortiquer les causes provoquant le défaut. L'outil Ishikawa a été principalement conçu afin d'effectuer la gestion de la qualité. Il identifie les causes réelles à une problématique, permet une analyse, en équipe très intéressante en lien avec un problème résoudre et amène l'équipe à se poser les vraies questions et, surtout, à amener de la rigueur dans l'analyse sur des faits réels et non pas sur des perceptions ou des préjugés. [13]

I.14.2. Méthode ABC (Diagramme Pareto)

I.14.2.1. Diagramme de Pareto

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

Un diagramme de Pareto est mis en évidence lorsque 20 % des catégories produisent 80 % d'un nombre total d'effets. Cette méthode permet donc de déterminer rapidement quelles sont les priorités d'actions. Si on considère que 20 % des causes représentent 80% des occurrences, agir sur ces 20 % aide à solutionner un problème avec un maximum d'efficacité.

I.14.2.2. Définition de la méthode ABC

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

La méthode ABC apporte une réponse. Elle permet l'investigation qui met en évidence les éléments les plus importants d'un problème afin de faciliter les choix et les priorités. On classe les événements (pannes par exemple) par ordre décroissant de coûts (temps d'arrêts, coût financier, nombre, etc..), chaque événement se rapportant à une entité. On établit en suite un graphique faisant correspondre les pourcentages de coûts cumulés aux pourcentages de types de pannes ou de défaillances cumulés. Sur le schéma (figure I.6), on observe trois zones. 1. Zone A : 20% des pannes occasionnent 80% des coûts ; 2. Zone B : les 30% de pannes supplémentaires ne coûtent que 15% supplémentaires ; 3. Zone C : les 50% de pannes restantes ne concernent que 5% du coût global. Conclusion : il est évident que la préparation des travaux de maintenance doit porter sur les pannes de la zone A. toujours de façon claire.

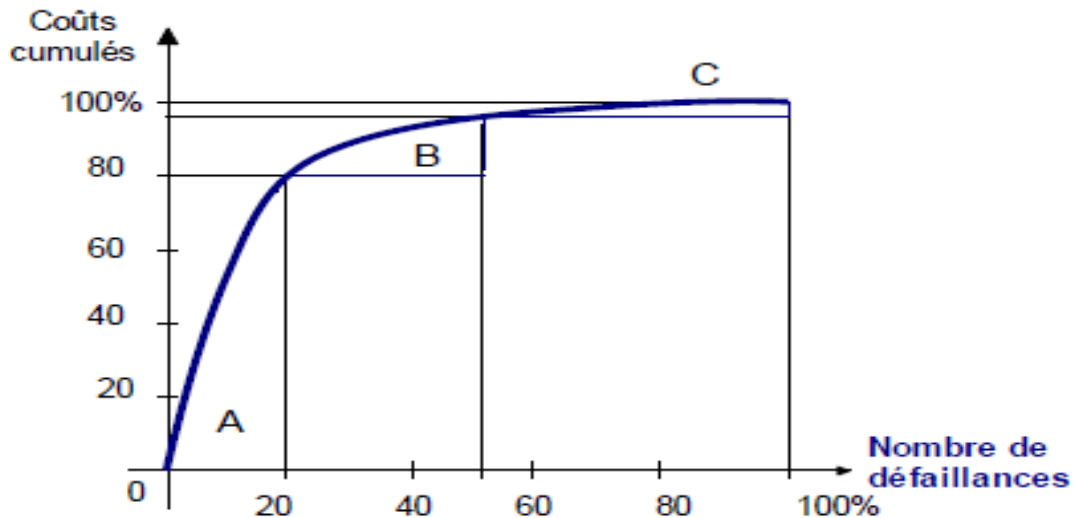


Figure I.6 : Diagramme de Pareto ou courbe ABC.

I.14.2.3. But de la méthode ABC

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

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

[14]

I.15. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons illustré la notion de maintenance, classifié leurs différentes méthodes et montré ses objectifs dans le domaine industriel d'une part et on a cité les opérations de la maintenance et vu les cinq niveaux de cette dernière d'une autre part. on a vu aussi au cours de ce chapitre, les méthodes d'analyse de défaillance (méthode ABC et l'histogramme de PARETO et Méthode cause-effet ou Ishikawa). Dans le chapitre suivant, on va étudier les paramètres de FMD (fiabilité, maintenabilité, disponibilité).

Chapitre II. Lois de calculs de fiabilité

II.1. Introduction

La sûreté de fonctionnement regroupe les activités d'évaluation de la fiabilité (assurer la continuité du service), de la Maintenabilité (être réparable), de la disponibilité (être prêt à l'emploi), d'un système, d'un produit ou d'un moyen. Ces évaluations permettent, par comparaison aux objectifs ou dans l'absolu, d'identifier les actions de construction (ou d'amélioration) de la sûreté de fonctionnement de l'entité. Ces évaluations sont prévisionnelles et reposent essentiellement sur des analyses inductives ou déductives des effets des pannes, dysfonctionnements, erreurs d'utilisation ou agressions de l'entité. [8]

II.2. Fiabilité

II.2.1. Notion de fiabilité d'un système

Un système peut être défini comme un ensemble de composants interdépendants, conçus pour réaliser une fonction donnée, dans des conditions données et dans un intervalle de temps donné, pour chaque système, il importe de définir clairement les éléments qui le caractérisent, à savoir : la fonction, la structure, les conditions de fonctionnement, les conditions d'exploitation, et l'environnement dans lequel il est appelé à opérer. [15]

II.2.2. Définition

La fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée donnée. Elle est caractérisée par la probabilité $R(t)$ que l'entité E accomplisse ces fonctions, dans les conditions données pendant l'intervalle de temps $[0; t]$, sachant que l'entité n'est pas en panne à l'instant 0.

$$R(t) = \text{Prob} \{E \text{ non défaillance sur } [0; t]\}. [16]$$

Définition selon la NF X 06-501 : la fiabilité est la caractéristique d'un dispositif exprimée par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation données et pour une période de temps déterminée. [14]

II.2.3. Objectifs de la fiabilité

La fiabilité a pour objectif de :

- ✓ Mesurer une garantie dans le temps ;
- ✓ Evaluer rigoureusement un degré de confiance ;
- ✓ Déchiffrer une durée de vie ;
- ✓ Evaluer avec précision un temps de fonctionnement ;
- ✓ Déterminer la stratégie de l'entretien ;

✓ Choisir le stock. [7]

II.2.4. Méthodes mathématiques

II.2.4.1. Densité de probabilité $f(t)$

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

Avec $t \geq \gamma$

β : est appelé paramètre de forme $\beta > 0$.

η : est appelé paramètre d'échelle $\eta > 0$.

γ : est appelé paramètre de position $-\infty < \gamma < +\infty$.

II.2.4.2. Fonction de répartition $F(t)$

Un dispositif, mis en marche pour la première fois, tombera inévitablement en panne à un instant T , non connu à

Priori.

T : est une variable aléatoire de fonction de répartition $F(t)$.

$F(t_i)$: est la probabilité pour que le dispositif soit en panne à l'instant t_i .

$$F(t_i) = P_r(T > t_i). \quad (\text{II.2})$$

$R(t_i)$: est la probabilité de bon fonctionnement à l'instant t_i .

$$R(t_i) = P_r(T > t_i). \quad (\text{II.3})$$

Probabilité complémentaire

$$F(t_i) + R(t_i) = 1 \quad (\text{II.4})$$

$$\int_0^t f(t) \cdot dt + \int_0^{\infty} f(t) \cdot dt = 1 \quad (\text{II.5})$$

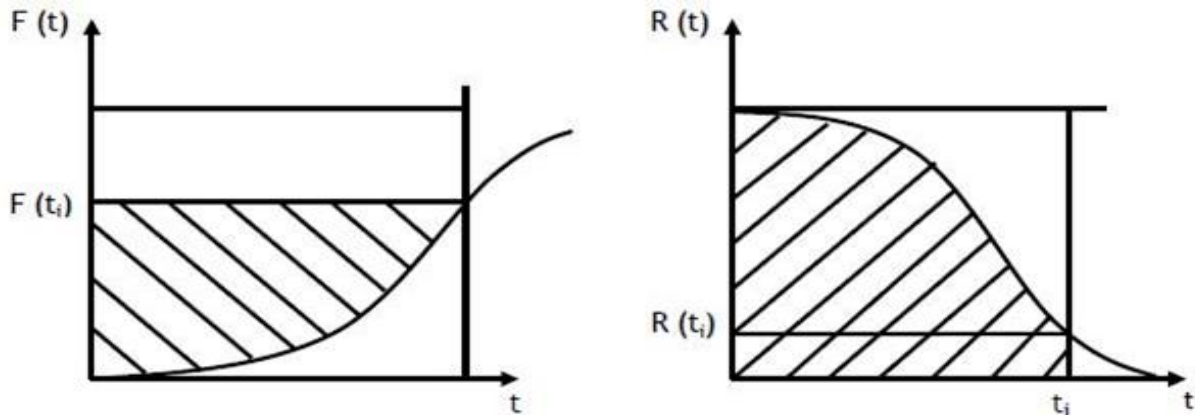


Figure II .1 : Courbe de fiabilité et fonction de répartition.

II.2.4.3. Taux de défaillance $\lambda(t)$

Soit N_0 : le nombre de dispositifs fonctionnant à $t=0$,

$N(t)$: le nombre de dispositifs fonctionnant à l'instant t ,

$N(t+\Delta t)$: le nombre de dispositifs fonctionnant à l'instant $t+\Delta t$.

$\frac{N(t)}{N_0}$: est un estimateur de la fiabilité $R(t)$

$$N(t) - N(t - \Delta t) = \Delta N > 0 \quad (\text{II.6})$$

Signe car $N(t)$ décroît

$$N(t + \Delta t) - N(t) = -\Delta N \quad (\text{II.7})$$

Si Δt tend vers 0, l'estimateur tend vers une limite qui est le taux de défaillance instantané :

$$\lambda(t)dt = -\frac{dN}{N(t)} \quad (\text{II.8})$$

Relation non démontrée : si $f(t)$ est la densité de probabilité, nous aurons

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (\text{II.9})$$

II.2.4.4. Fiabilité $R(t)$

On intègre cette expression entre 0 et t :

$$-\int_0^t \lambda(t)dt = \ln N(t) + K \quad (\text{II.10})$$

Pour $t=0$, $N(t)=N_0$ d'où $K=\ln N_0$.

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (\text{II.11})$$

$$\frac{N(t)}{N_0} = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (\text{II.12})$$

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (\text{II.13})$$

Cette relation est fondamentale, car, quelle que soit la loi de fiabilité, elle permet un tracé expérimental de la fiabilité en fonction du temps, l'évolution du taux de défaillances étant connue [17].

II.2.4.5. Fiabilité des systèmes complexes

D'une manière générale, les systèmes réels sont constitués de plusieurs composants et présentent plusieurs modes de défaillance ; de tels systèmes sont dits complexes.

Une modélisation fonctionnelle sous forme de schéma-bloc de ces systèmes permet d'en déterminer la fiabilité [18].

a) **Fiabilité d'un système série**

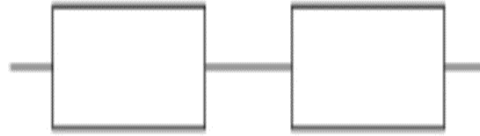


Figure II .2 : Système série.

Un système série fonctionne si et seulement si tous les composants fonctionnent. La fiabilité est calculée par la relation suivante :

$$R(t) = \Pr(T > t) \tag{II.14}$$

$$= \Pr[(T_1 > t) \cap (T_2 > t) \cap \dots] \tag{II.15}$$

$$= \prod_i \Pr(T_i > t) = \prod_i R_i(t) \tag{II.16}$$

b) **Fiabilité d'un système parallèle**

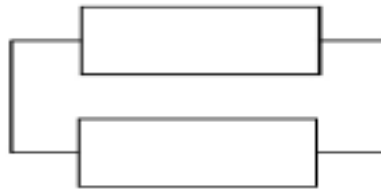


Figure II .3 : Système parallèle.

Un système parallèle fonctionne si au moins un de ses composants fonctionne.

La fiabilité pour ce système est donnée par :

$$R(t) = 1 - F(t) \tag{II.17}$$

$$= 1 - \Pr[(T_1 \leq t) \cap (T_2 \leq t) \cap \dots] \tag{II.18}$$

$$= 1 - \prod_i \Pr(T_i \leq t) = \prod_i R_i(t) \tag{II.19}$$

c) **Redondance active m parmi n**

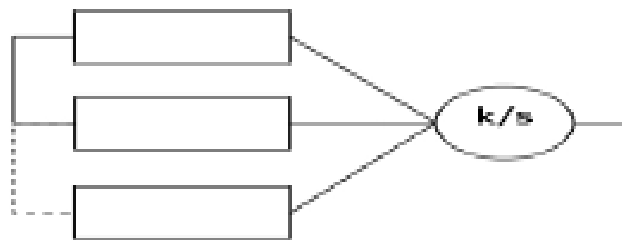


Figure II .4 : Redondance m parmi n.

Un système en redondance active m parmi n fonctionne si au moins m parmi les n composants redondants fonctionnent [18].

Si les composants sont indépendants et identiquement distribués ($R=R_i, i=1,2,\dots,n$), alors la fiabilité du système est donnée par :

$$R(t) = \sum_{j=m}^n \binom{n}{j} R^j (1 - R)^{n-j} \quad (\text{II.20})$$

Avec

$$\binom{n}{j} = \frac{n!}{j!(n-j)!} \quad (\text{II.21})$$

d) Redondance passive

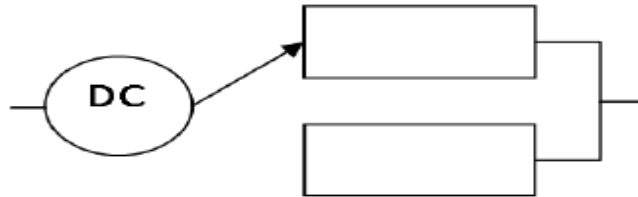


Figure II .5 : Redondance passive.

Dans une redondance passive les composants redondants ne sont mis en service que lorsque les composants du système sont défectueux.

Dans l'exemple de la figure II .4 à deux composants en redondance passive, le deuxième composant est mis en service lorsque le composant principal est défectueux,[18].

Si les composants ont la même loi de fiabilité $R(t)$, la fiabilité de ce système est donnée par:

$$R_{sys}(t) = R(t) + \int_0^t f(\tau) R(t - \tau) d\tau \quad (\text{II.22})$$

II.2.4.6. MTBF

C'est la moyenne de temps de bon fonctionnement, [18].

$$MTBF = \frac{\sum \text{Heures de défaillance}}{N^\circ \text{d' equipment en essai}} \quad (\text{II.23})$$

$$MTBF = \frac{\sum TBF}{N^\circ_c} \quad (\text{II.24})$$

Soit à partir de la densité de probabilité :

$$MTBF = E(t) = \int t f(t) dt = \int_0^\infty R(t) dt \quad (\text{II.25})$$

II.2.4.7. Le taux de défaillance $\lambda(t)$ en fonction du temps t

En pratique, le taux de panne λ peut être constant, mais aussi croissant ou décroissant au cours du temps, avec changement graduel, sans discontinuités. Pour la majorité des produits industriels, les variations de $\lambda(t)$ à la cour du temps « courbes dites en baignoire » (figure suivant) présentent trois zones typiques :

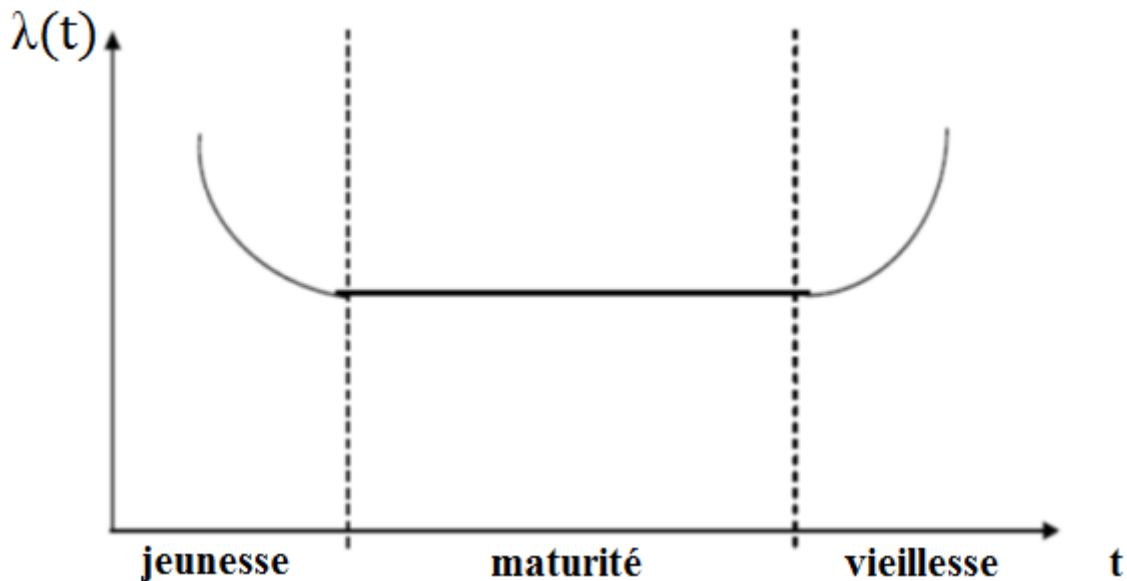


Figure II .6 : Courbe en baignoire. [19]

Zone 1 \Rightarrow Epoque de jeunesse

Zone 2 \Rightarrow Epoque de maturité, fonctionnement normal, défaillance aléatoire indépendante du temps.

Zone 3 \Rightarrow Epoque d'obsolescence, défaillances d'usure ou pannes de vieillesse.

Le taux de défaillance, noté $\lambda(t)$, est un indicateur de la fiabilité. Il représente une proportion de dispositifs survivants à un instant [19].

II.2.4.8. Les principales lois utilisées

La fiabilité est, de plus en plus fréquemment, une grandeur quantitative et nécessite la connaissance des distributions de durée de vie afin de l'estimer. Dans le cadre du système mécatronique, ces distributions doivent absolument tenir compte de tous les mécanismes de défaillance associés aux différentes technologies.

Nous présentons dans cette section les lois et les modèles de fiabilité susceptibles, selon l'expérience, de représenter des distributions de durée de vie qui interviennent le plus

fréquentement dans l'analyse de la fiabilité mécatronique. Nous rappelons les principales propriétés de ces lois, les fonctions de fiabilité associées, les densités de probabilité ainsi que les taux de défaillance. [20]

II.2.4.8.1. Loi exponentielle

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales. La loi exponentielle est la plus couramment utilisée en fiabilité électronique pour décrire la période durant laquelle le taux de défaillance des équipements est considéré comme constant (défaillance aléatoire). Elle décrit le temps écoulé jusqu'à une défaillance, ou l'intervalle de temps entre deux défaillances.

Elle est définie par un seul paramètre, le taux de défaillance, λ . [21]

Elle est caractérisée par :

– la fiabilité

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (\text{II.26})$$

– la densité de probabilité

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (\text{II.27})$$

– le taux de défaillance

$$\lambda(t) = \lambda \quad (\text{II.29})$$

II.2.4.8.2. Loi de Weibull

La loi de Weibull, est souvent utilisée en mécanique ; elle caractérise bien le comportement du produit dans les trois phases de vie selon la valeur du paramètre de forme β : période de jeunesse ($\beta < 1$), période de vie utile ($\beta = 1$) et période d'usure ou vieillissement ($\beta > 1$). La loi de Weibull est définie par deux paramètres η et β .

Elle est caractérisée par :

– la fiabilité

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{II.30})$$

– la densité de probabilité

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{II.31})$$

– le taux de défaillance

$$\lambda(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (\text{II.32})$$

II.2.4.8.3. Loi normale

La loi normale est très répandue parmi les loïs de probabilité car elle s'applique à de nombreux phénomènes. La loi normale est définie par la moyenne μ et l'écart type σ :

– la fonction de répartition. [21]

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (\text{II.33})$$

– la densité de probabilité

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{II.34})$$

La fiabilité est donnée par :

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{(t-\mu)}{\sigma}\right) \quad (\text{II.35})$$

Si t suit une loi normale (μ, σ) , $u = \frac{t-\mu}{\sigma}$ suit une loi normale centrée réduite dont la fonction de répartition, notée ϕ , est donnée par :

$$\phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (\text{II.36})$$

II.2.4.8.4. Loi log-normale

Une variable aléatoire continue et positive t est distribuée selon une loi log normale si son logarithme est distribué suivant une loi normale. Cette distribution est utilisée en fiabilité pour modéliser les défaillances par fatigue. La loi log-normale a deux paramètres μ et σ :

– la fiabilité

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right) \quad (\text{II.37})$$

– la densité de probabilité

$$f(t) = \frac{1}{\sigma.t.\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{II.38})$$

– le taux de défaillance

$$f(t) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right)^2}}{t \int_0^{\infty} \sigma\sqrt{2\pi}f(t)dt} \quad (\text{II.39})$$

II.2.4.8.5. Loi Gamma

Elle représente la loi de probabilité d'occurrence de a événements dans un processus poissonnier. Par exemple si t est le temps entre les défaillances successives d'un système, et que t suive une distribution exponentielle, le temps cumulé d'apparition de a défaillances suit une loi Gamma :

– la densité de probabilité

$$f(t) = \frac{t^{a-1}e^{-\frac{t}{b}}}{b^a\Gamma(a)} \quad (\text{II.40})$$

– le taux de défaillance

$$\lambda(t) = \frac{t^{a-1}e^{-\frac{t}{b}}}{b^a \int_t^\infty \Gamma(a)f(u)du} \quad (\text{II.41})$$

II.2.4.8.6. Loi Bêta

Cette loi représente, en particulier, la probabilité pour qu'un matériel survive jusqu'à un instant t , quand on essaie n matériels. D'où son intérêt dans l'évaluation de la durée des essais de fiabilité. La loi Bêta a deux paramètres a et b :

– la densité de probabilité

$$f(t) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} t^{a-1}(1-t)^{b-1} \quad (\text{II.42})$$

II.2.4.8.7. Loi uniforme

La loi uniforme est souvent utilisée en fiabilité pour les essais bayésiens en l'absence de connaissances pour construire l'information a priori. Cette loi peut prendre toute valeur dans un intervalle (a, b) avec une densité de probabilité constante.

– la fonction de répartition

$$F(t) = \frac{t-a}{b-a} \quad (\text{II.43})$$

– la densité de probabilité

$$f(t) = \frac{1}{b-a} \quad (\text{II.44})$$

II.2.4.8.8. La loi de Birnbaum-Saunders

Pour caractériser des défaillances dues à la propagation de fissure par fatigue, Birnbaum et Saunders (1969) ont proposé une distribution de vie basée sur deux paramètres. Cette distribution, pour une variable aléatoire non négative T , est obtenue en tenant compte des

caractéristiques de base du processus de fatigue. La variable aléatoire T représente les instants de défaillance.

La densité de probabilité d'une loi Birnbaum et Saunders de paramètre α et β est donnée par la formule :

$$f(t) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\alpha^2\beta t^2} \cdot \frac{t^2 - \beta^2}{\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{\beta}{t}\right)^{\frac{1}{2}}} \cdot \exp\left[\frac{1}{2\alpha^2}\left(\frac{t}{\beta} + \frac{\beta}{t} - 2\right)\right] \quad (\text{II.45})$$

Avec $t > 0$; $\alpha > 0$; $\beta > 0$

La fonction de fiabilité est donnée par la formule :

$$R(t) = 1 - \Phi\left\{\frac{1}{\alpha}\left[\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{\beta}{t}\right)^{\frac{1}{2}}\right]\right\} \quad \alpha > 0, \beta > 0 \quad (\text{II.46})$$

Où Φ est la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite. [1]

II.2.4.8.9. Relation entre la maintenance et la fiabilité

La figure II.7 présente la contribution des différents types de maintenance en ce qui concerne la fonction de fiabilité ($R(t)$) et la durée de vie utile de l'équipement.

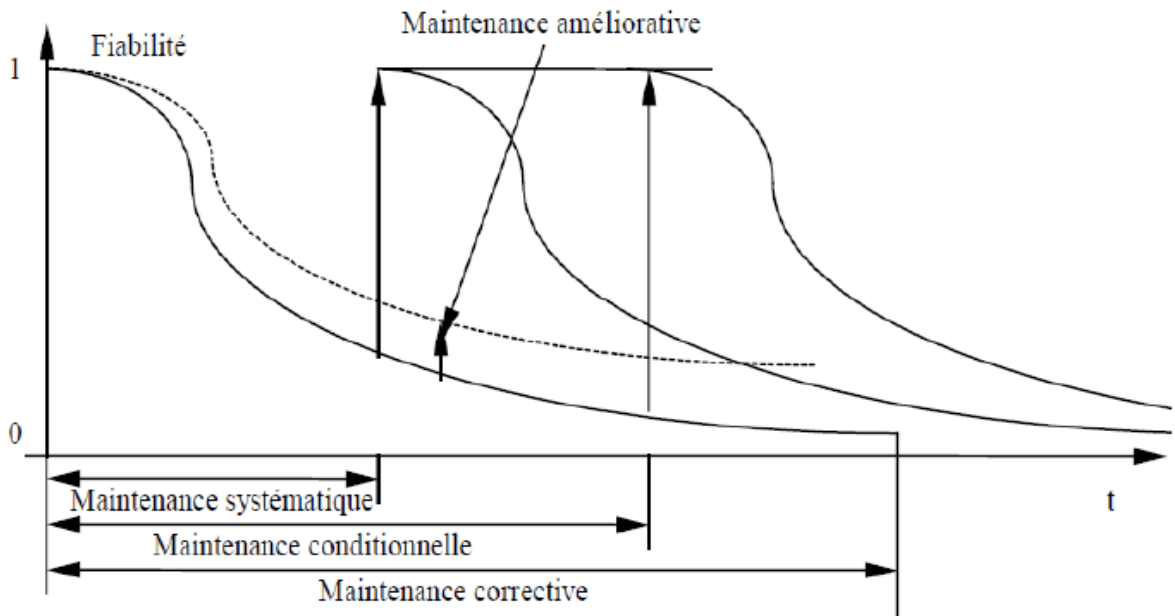


Figure II.7 : l'impact de la maintenance sur la fiabilité des équipements.

Il va sans dire qu'une réduction du taux de panne $\lambda(t)$ entraîne une amélioration de la fonction de fiabilité $R(t)$. C'est dans cette optique que la maintenance améliorative a été instaurée. La maintenance préventive, avec toutes ses variantes, va en revanche tenter de ramener le taux

de panne à son niveau le plus bas en remplacement le composante usée sans améliorer les caractéristiques intrinsèques de l'équipement. [22]

II.2.4.8.10. MTTR

La MTTR est la Moyenne des temps Technique de Réparation. Comme la MTBF, elle est calculée à partir des historiques de défaillances et plus précisément à partir des TTR (temps de défaillance).

$$MTTR = \frac{\sum \text{temp de réparation}}{N_c} \quad (\text{II.47})$$

II.2.5. Les tests d'ajustement

Ces tests ont pour but de vérifier qu'une variable aléatoire, dont on possède un n-échantillon indépendant, suit bien une loi donnée (au moins dans sa forme, sinon dans ses paramètres). Il s'agit d'un test portant sur la validité d'un modèle aléatoire. Il a pour but de légitimer le choix du modèle théorique [23].

On test :

$$H_0 \text{ "Fest la loi de } X \text{ contre } H_1 \text{ "F n'est pas la loi de } X \text{"}$$

II.2.5.1. Tests Kolmogorov-Smirnov

Soit X_1, X_2, \dots, X_n un n-échantillon issue de X de fonction de répartition F .

On cherche à tester l'ajustement de la loi de X par une loi théorique fixé F_0

C'est-à-dire :

$$H_0 \text{ "F = } F_0 \text{" contre } H_1 \text{ "F } \neq F_0 \text{"}$$

- **Principe du test**

Le test de K.S [24] implique le calcul de :

- fonction de répartition empirique de l'échantillon c'est-à-dire :

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 1_{X_j < x} = \frac{\text{nombre d'observation } < x}{\text{taille de l'échantillon}} \quad (\text{II.48})$$

- Calculer le plus grand écart entre la distribution empirique $F(x)$ et la distribution théorique $F_0(x)$ c'est-à-dire :

$$D = \max_{x \in \mathbb{R}} |F(x) - F_0(x)| \quad (\text{II.49})$$

- On fixe un seuil de signification α et on compare cet écart D à des valeurs critiques particulières qu'on note $d_{(n,\alpha)}$ obtenus à partir de la table de kolmogrov-smirnov. la décision sera :

$$\begin{cases} \text{On accepte } H_0 & \text{si } D < d_{(n,\alpha)} \\ \text{On rejette } H_0 & \text{sinon} \end{cases}$$

II.2.5.2. Test Khi-Deux

Posé par Karl Pearson en 1900, le test χ^2 est sûrement le test le plus répandu pour tester l'adéquation d'une loi, continue ou discrète, à des données.

Le problème qui se pose est de savoir si les écarts entre la distribution observée et la loi théorique peuvent être jugés faible [24].

- **Principe du test**

Soit X_1, X_2, \dots, X_n un n-échantillon issue de X de fonction de répartition F .

C'est-à-dire :

On cherche à tester l'ajustement de la loi de X par une loi théorique fixé F_0 .

C'est-à-dire :

$$H_0 "F = F_0" \text{ contre } H_1 "F \neq F_0"$$

- **Construction du test**

Soit X_1, X_2, \dots, X_n un n-échantillon issue de X de fonction de répartition F .

On partage le domaine de X en r intervalles I_1, I_2, \dots, I_r

Soit n_i l'effectif de la classe I_i .

On note p_i la probabilité théorique liée à la classe I_i .

Le test est basé sur la statistique (sous l'hypothèse H_0) :

$$K_n^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \quad (\text{II.50})$$

- **Règle de décision**

Remarque:

Si K_n^2 est très petit, c'est que la distribution théorique est Proche de la distribution empirique.

Alors qu'au contraire, si K_n^2 est grand, l'écart entre les deux distributions est important, par conséquent :

- Si $K_n^2 > \chi_{(r-1-q, \alpha)}^2$ on rejette H_0

- Si $K_n^2 > \chi^2_{(r-1-q, \alpha)}$ on ne rejette pas H_0

Donc :

L'ajustement est validé.

q : étant le nombre de paramètre estimés.

Mais pour effectuer le test de Khi-deux il faut vérifier certaines conditions :

- Le nombre de classe $r \geq 7$.
- L'effectif théorique $np_i \geq 8$.
- Avoir dans la mesure du possible des classes d'effectifs théoriques comparables.

II.3. Maintenabilité

II.3.1. Définition

D'après la norme AFNOR X 60-010 ; « dans des conditions données d'utilisation, la Maintenabilité est l'aptitude d'un dispositif à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir sa fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits ».

Par analogie avec la fiabilité, il est possible de donner à la maintenabilité une définition probabiliste :

« La maintenabilité est la probabilité de rétablir un système dans des conditions de fonctionnement spécifiées, en des limites de temps désirées, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions et avec des moyens prescrits » [6]

II.3.2. Temps Techniques de Réparation TTR

Le TTR d'une intervention se compose en général de la somme des temps suivants :

- Temps de vérification de la réalité de la défaillance (quelquefois, il y a de fausses alarmes)
- Temps de diagnostic ;
- Temps d'accès à l'organe défaillant (déposes ou bien démontages);
- Temps de remplacement ou de réparation ;
- Temps de réassemblage ;
- Temps de contrôle et d'essais.

Les temps « morts » suivants sont à éliminer du TTR :

- Temps d'attente pour indisponibilité des techniciens, des outils ou des pièces de rechange
- Arrêts de travail ; etc.

Si les temps « morts » sont supérieurs ou égaux au TTR, une remise en cause de l'organisation et de la gestion de la maintenance est indispensable. [6]

II.3.3. Amélioration de la maintenabilité

L'amélioration de la maintenabilité passe par :

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

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

La maintenance doit améliorer la maintenabilité par les actions suivantes :

- 1- disponibilité de la documentation tenue à jour du matériel.
- 2- utilisation des systèmes d'aide au diagnostic
- 3- utilisation des capteurs intégrés pour la localisation de la panne
- 4- disponibilité des accessoires outillages [15]

II.3.4. Les critères de maintenabilité

Les normes NF X 60-300 et X 60-301 spécifient cinq types de critères de maintenabilité. Le premier critère est relatif à la surveillance de la maintenance préventive. Il est important de connaître le niveau l'accessibilité de la composante, sa démontabilité et son interchangeabilité. Le deuxième est relatif à la maintenance corrective, plus particulièrement, le temps de recherche de panne ou de défaillance et le temps de diagnostic. Le troisième critère est relatif à l'organisation de la maintenance, pris en compte par la périodicité du préventif, le regroupement à des périodes identiques, l'homogénéité de la fiabilité des composants, la présence d'indicateurs et de compteurs et la complexité des interventions. L'avant-dernier critère est lié à la qualité de la documentation technique. Celui-ci comporte la valeur du contenu, la disponibilité de la documentation, le mode de transmission et les principes généraux de rédaction et de présentation de la documentation technique. Le dernier critère de maintenabilité est lié au suivi du bien par le fabricant. Il sera question de l'évolution du fabricant, de la qualité du service après-vente et de l'obtention des pièces de rechange. [6]

II.3.5. Les indicateurs de maintenabilité

Indice	Description
MTTR	La MTTR est le principal indicateur de maintenabilité. Elle peut être obtenue par la moyenne statistique d'un échantillon de valeurs TTR ou par l'espérance mathématique de TTR obtenue à partir d'un modèle probabiliste. n
M (t)	C'est la fonction de maintenabilité stricte. C'est la probabilité associée à un instant T, d'une remise en état de fonctionnement. Elle est déterminée à partir d'un modèle probabiliste.

Tableau II.1 : Les indicateurs de maintenabilité. [6]

II.3.6. Expressions mathématiques

Il y a analogie entre l'étude probabiliste de la fiabilité et la maintenabilité. Dans le cas de la maintenabilité, la variable aléatoire est la durée de l'intervention ou temps technique de réparation (TTR). La densité de probabilité est notée g(t).

La maintenabilité M (t) s'exprime en fonction de la densité de probabilité, notée g(t), par la relation suivante[6]:

$$M(t) = \int_0^t g(t)d(t) \tag{II.51}$$

M (t) représente également la probabilité de réparation d'une durée TTR < t :

$$M(t) = \text{Pr}(TTR < t) \tag{II.52}$$

Le taux de réparation est noté μ (t) et s'exprime par :

$$\mu(t) = g(t) / (1 - M(t)) \tag{II.53}$$

D'où :

$$M(t) = 1 - \exp \left[- \int_0^t \mu(t)dt \right] \tag{II.54}$$

μ(t) est souvent considéré comme constant (modèle exponentiel), d'où:

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \tag{II.55}$$

Le MTTR est donné par :

$$MTTR = \int_0^{+\infty} t g(t)dt \tag{II.56}$$

$MTTR = 1 / \mu$ dans le cas où le taux de réparation μ (t) est constant.

En ce qui concerne l'obtention des données, les TTR sont saisis sur les bons de travaux (BT), et la procédure d'estimation de M (t) est semblable à celle de la fiabilité.

II.4. La disponibilité

II.4.1. Définition

Aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée.

Cette aptitude dépend de la combinaison de la fiabilité, de la maintenabilité et de la logistique de maintenance.

Les moyens extérieurs nécessaires autres que la logistique de maintenance n'affectent pas la disponibilité du bien (NF EN 13306). [10]

II.4.2. Quantification de la disponibilité :

La disponibilité peut se mesurer :

- a) sur un intervalle de temps donné (disponibilité moyenne),
- b) à un instant donné (disponibilité instantanée),
- c) à la limite, si elle existe, de la disponibilité instantanée lorsque $t \rightarrow \infty$ (disponibilité asymptotique) [10]

II.4.3. Différents niveaux de la disponibilité

On distingue cinq types de la disponibilité sont [8]:

II.4.3.1. Disponibilité intrinsèque théorique

Cette disponibilité est évaluée en prenant en compte les moyennes des temps de bon fonctionnement et les moyennes de réparations, ce qui donne

$$D_i = \frac{MTBF}{(MTBF+MTTR)} \quad (\text{II.57})$$

II.4.3.2. Disponibilité moyenne

La disponibilité moyenne sur un intervalle de temps donné peut-être évalué par les rapports suivants :

$$D_m = \frac{TCBF}{(MTCBF+TCI)} \quad (\text{II.58})$$

Où :

TCI: Temps cumulé d'immobilisation

TCBF = temps cumulé de bon fonctionnement

II.4.3.3. Disponibilité opérationnelle

Pour cette mesure, sont pris en compte les temps logistiques, ce qui donne:

$$D_0 = \frac{MTBF}{(MTBF+MTTR+MTL)} \quad (\text{II.59})$$

Avec :

MTL : moyenne des temps logistiques

II.4.3.4. Disponibilité asymptotique

Lorsque λ et μ sont indépendants de temps et quand (t) devient grand, on constate que D (t) tend vers une valeur constante. Cette valeur est souvent dénommée disponibilité asymptotique et se note A_∞ est égale à :

$$A_\infty = \frac{\mu}{\mu+\lambda} \quad (\text{II.60})$$

Avec

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (\text{II.61})$$

Et

$$\mu = \frac{1}{MTBR} \quad (\text{II.62})$$

II.4.3.5. Disponibilité instantanée

Pour un système avec l'hypothèse d'un taux de défaillance λ constant et d'un taux de réparation μ constant, on montre que la disponibilité instantanée a pour expression :

$$D(t) = \frac{\mu}{(\mu+\lambda)} + \frac{\lambda}{(\mu+\lambda)} e^{-(\lambda+\mu)t} \quad (\text{II.63})$$

II.5. Relation entre fiabilité, maintenabilité et disponibilité

Une fiabilité parfaite (c.-à-d., aucune défaillance pendant la vie du système) est difficile à réaliser. Même lorsqu'un bon niveau de fiabilité est réalisé, quelques défaillances sont prévues, Les effets des défaillances sur le coût de disponibilité des systèmes réparables peuvent être réduits au minimum avec un bon niveau de maintenabilité. Un système qui est fortement maintenable peut être remis au plein fonctionnement dans un minimum de temps avec un

minimum dépense de ressource. La valeur de disponibilité est un compromis entre la durée moyenne pour le quelle le produit est disponible pour effectuer ces fonctions et le temps de non-fonctionnement pour cause de panne, réparation ...etc. Cela implique que la fiabilité du produit soit mise en balance avec les performances du service de maintenance afin d'obtenir la même valeur de disponibilité dans tous les cas. [25]

La figure suivante montre la relation entre les paramètres de la sureté de fonctionnement :

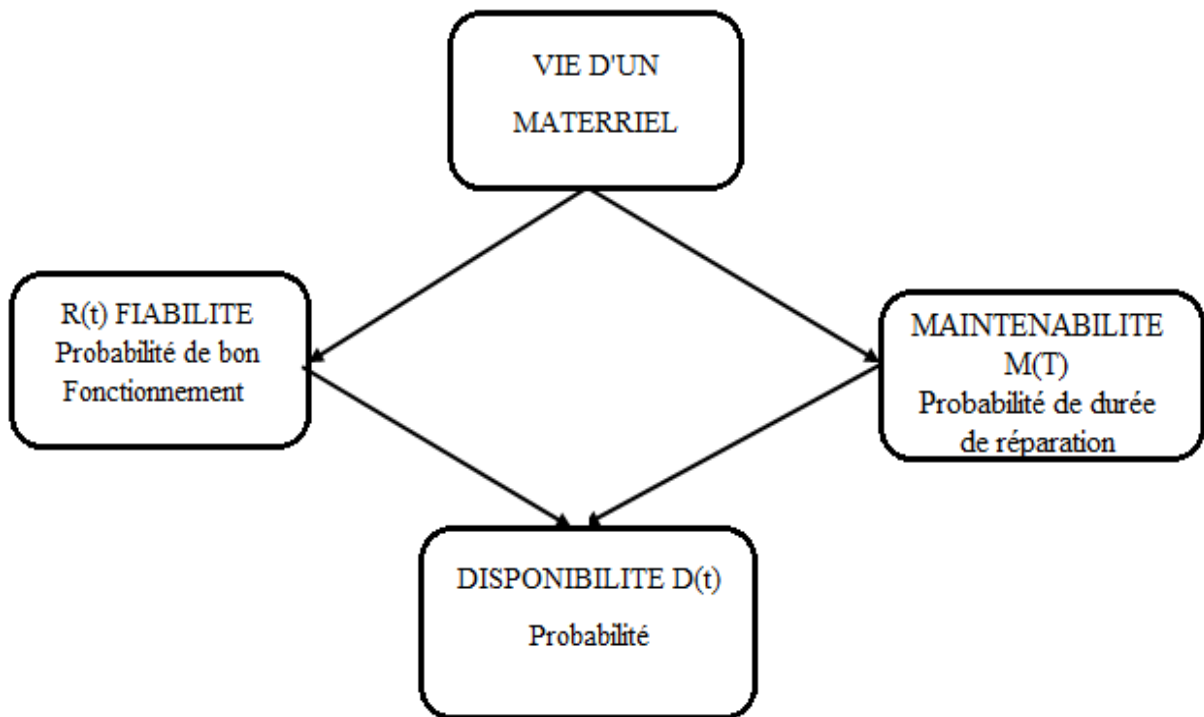


Figure II.8 : Relation entre les paramètres FMD.

Pour qu'un matériel soit disponible il faut s'assurer que sa fiabilité est optimum et qu'il est aussi maintenable. [15]

II.6. Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à l'étude des notions de base concernant la fiabilité, maintenabilité et la disponibilité pour bien comprendre les mots clés de notre travail, on a vu au cours de ce chapitre, les différentes méthodes de calcul pour évaluer la fiabilité, la fonction de répartition et le taux de défaillance ainsi que les tests de vérification de ces méthodes.

On a aussi défini et modélisé la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité pour faciliter les calculs dans le chapitre suivant.

Chapitre III. Calcul et amélioration de la fiabilité du système choisi

III.1. Introduction

Généralement, l'application de l'analyse FMD nécessite le choix d'un système et leur historique de pannes. Cette application permet d'évaluer le niveau de la sûreté de fonctionnement, c'est-à-dire ; le calcul de la fiabilité, de la maintenabilité et de la disponibilité. Dans notre mémoire, on choisit la machine Aléseuse Fraiseuse à cause de son importance dans l'entreprise MEI.

III.2. Historique des pannes

D'après l'historique des pannes de la machine choisie (Aléseuse Fraiseuse), on résume les temps d'arrêt dans le tableau III.1

N°	Type de panne	Temps d'arrêt (h)	Date de début de réparation	Date de la remise en service
01	panneau d'command ne fonction pas	07	21/01/2013	21/01/2013
02	Arrêt du mouvement de l'axe Z	50	23/02/2013	23/02/2013
03	panne an niveaux d'axe Z	45	22/03/2013	29/03/2013
04	panne le changement du broche)	14	02/04/2013	03/04/2013
05	panne de pompe hydraulique du travail vertical	66	05/05/2013	06/05/2013
06	fuite d'huile au niveau du bac de la pompe hydraulique	17	16/05/2013	17/05/2013
07	panne de table d'alésage	09	15/06/2013	16/06/2013

08	panne de la broche ne tourne pas	87	09/09/2013	09/09/2013
09	la broche ne tourne pas	90	09/11/2013	09/11/2013
10	panne d'axe X	44	03/12/2013	06/12/2013
11	sou de tirage	10	09/12/2013	10/12/2013
12	panne de servomoteur	100	01/01/2014	05/01/2014
13	Réparation de panne électrique	06	10/02/2014	10/02/2014
14	Réparation de la table panne électrique	120	06/07/2014	06/07/2014
15	panne de servomoteur	16	22/12/2014	23/12/2014
16	bruit anormale donne la broche	30	02/01/2015	04/01/2015
17	fuit d'huile au niveau du pressostat	04	27/04/2015	27/04/2015
18	panne d'axe Y	12	28/04/2015	29/04/2015
19	panne d'axe X	18	31/05/2015	01/06/2015
20	Réparation de la panne électrique	10	11/07/2015	11/07/2015

Tableau III.2 : L'historique des pannes de la machine Aléuseuse Fraiseuse.

III.3. L'analyse FMD

III.3.1. La fiabilité

Pour simuler la fonction de fiabilité, on utilise un logiciel de simulation qui s'appelle **Easyfit**. EasyFit permet d'ajuster automatiquement les distributions aux données échantillon et de sélectionner le meilleur modèle en secondes. Il est conçu de façon à rendre l'analyse des données aussi facile que possible, laissant en coulisse les détails techniques compliqués et vous permettant ainsi de vous concentrer sur les objectifs de vos affaires (voir l'annexe A).

Le tableau suivant (tableau III.2) comportent le TBF classés par ordre croissant, et les $F(i)$ calculés par la méthode des ranges moyen $F(i) = \frac{Ni}{N+1} \simeq F(t)$

Ranges	TBF	F(t)
01	24	0,04761905
02	32	0,0952381
03	80	0,1428571
04	176	0,1904762
05	184	0,2380952
06	192	0,2857143
07	200	0,3333333
08	208	0,3809524
09	216	0,4285714
10	232	0,4761905
11	240	0,5238095
12	248	0,5714286
13	256	0,6190476
14	260	0,6666667
15	264	0,7142857

16	288	0,7619048
17	320	0,8095238
18	328	0,8571429
19	368	0,9047619
20	432	0,952381

Tableau III.2 : Calcul de la fonction de répartition.

L'exécution du logiciel **Easyfit** nous permet d'extraire les différents paramètres nécessaires pour calculer la fonction de répartition théorique $F(t)$. Le calcul de $F(t)$ a pour but de choisir le modèle adéquat (acceptable), Les valeurs de ces paramètres sont résumées dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs
Beta(β)	1,325
Eta(η)	270,66
Gamma(γ)	0
MTBF	227,4

Tableau III.3 : les paramètres de calcul de fiabilité.

Pour vérifier que le modèle est accepté pour calculer les différentes fonctions (la fiabilité, la densité de probabilité et le taux de défaillance), on utilise le test de KOLMOGOROV-SMIRNOV.

III.3.1.1. 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 $\alpha = 5\%$. Ce test consiste à calculer l'écart entre la fonction théorique $F(t)$ et la fonction réelle $F(i)$ puis prendre le maximum en valeur absolue D_n . Cette valeur est comparée avec $D_n \cdot \alpha$ Qui est donnée par la table de Kolmogorov Smirnov.

La valeur de D_n est donnée par le tableau de KOMOGOROV – SMIRNOV (tableau III.4).

Les résultats de comparaison entre les deux fonctions de réparation sont présentés dans le tableau suivant :

Ranges	F(t) théorique	F (ti) réelle	Dni
01	0,0393066	0,04761905	0,0083
02	0,0572932	0,0952381	0,0379
03	0,180286	0,1428571	0,0374
04	0,431810	0,1904762	<u>0,2413</u>
05	0,450968	0,2380952	0,2128
06	0,469693	0,2857143	0,1839
07	0,488086	0,3333333	0,1547
08	0,506039	0,3809524	0,1250
09	0,523601	0,4285714	0,0950
10	0,557449	0,4761905	0,0812
11	0,573737	0,5238095	0,0499
12	0,589549	0,5714286	0,0181
13	0,604972	0,6190476	0,0140
14	0,612523	0,6666667	0,0467
15	0,619930	0,7142857	0,1419
16	0,662300	0,7619048	0,0994
17	0,712979	0,8095238	0,0965
18	0,724674	0,8571429	0,1441
19	0,777382	0,9047619	0,1273
20	0,843984	0,952381	0,1083

Tableau III.4 : Estimation de la fiabilité et la fonction de répartition.

Le tableau III.4 montre que $D_{max} = 0,2413$ et d'après le tableau de KOMOGOROV – SMIRNOV (voir l'annexe B) :

$$D_{n, \alpha} = D_{4,0.05} = 0,62394$$

$D_{n,max} < D_{4,0.05}$ implique que le modèle de Weibull est acceptable

L'utilisation du logiciel **Easyfit** permet de présenter graphiquement la fonction de répartition qui montrées par la figure (III.1). La figure ci-dessous représente la fonction de répartition en fonction du temps de bon fonctionnement (TBF).

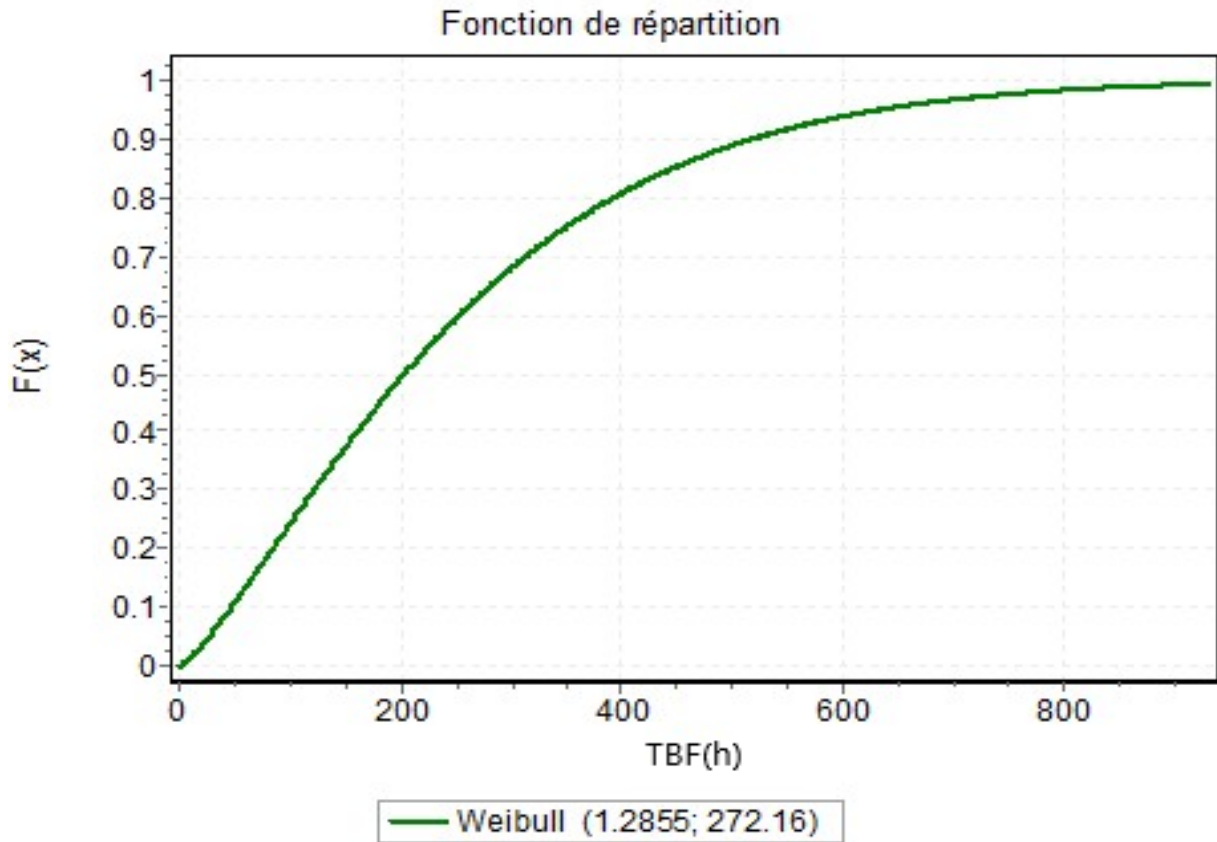


Figure III.1 : Fonction de répartition F(t).

La figure III.1 illustre la fonction de répartition $F(t)$ en fonction du temps de bon fonctionnement (TBF). On observe d'après cette figure que la fonction de répartition augmente avec l'augmentation du temps de bon de fonctionnement (TBF).

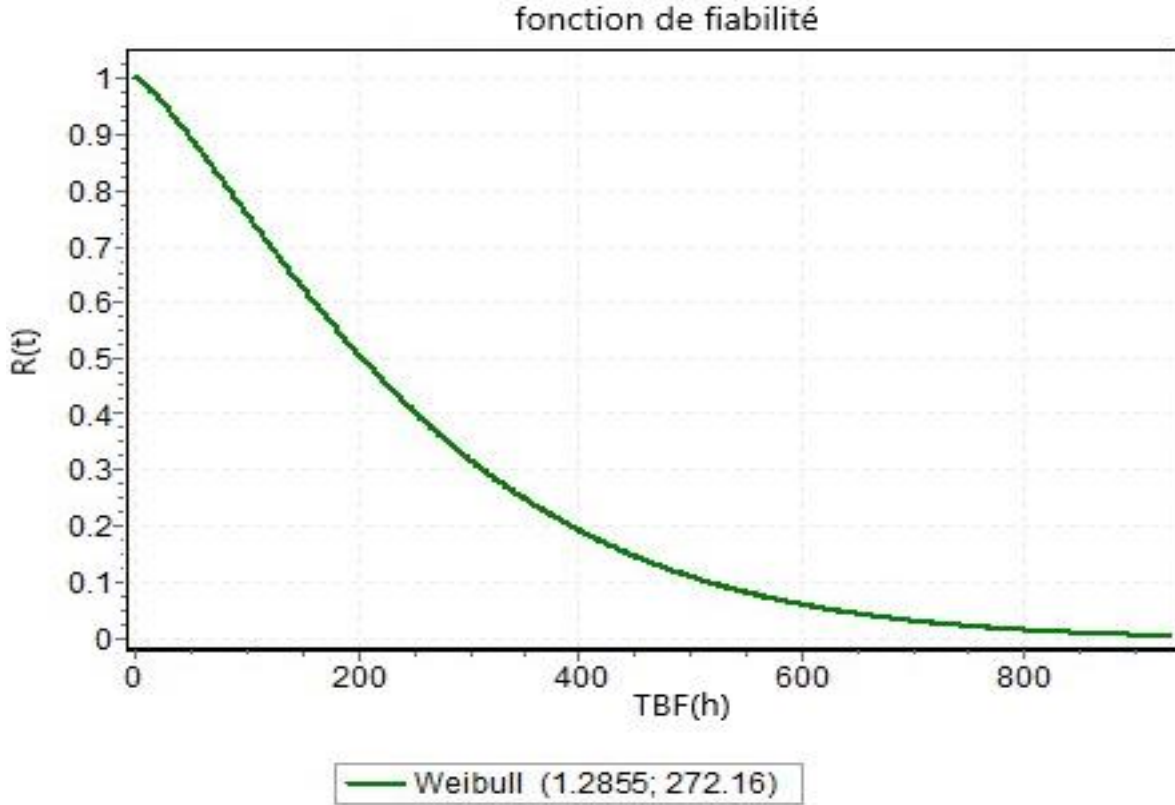


Figure III.2 : La fonction de fiabilité R(t).

La figure. III.2 montre la fonction de fiabilité R(t) en fonction du temps de bon fonctionnement (TBF), on remarque à partie cette courbe que la fiabilité diminue avec le temps.

III.3.1.2. Calculs de la fiabilité, de la densité probabilité et du taux de défaillance

On résume les calculs des valeurs de la fiabilité, de la densité de probabilité et du temps de défaillance dans le tableau III.5

TBF	R(t)	$\lambda(t)$	f(t)
24	0,960694	0,00223	0,00214
32	0,942706	0,00245	0,00231
80	0,819714	0,00329	0,00270
176	0,56819	0,00426	0,00242
184	0,549032	0,00432	0,00237
192	0,530307	0,00437	0,00232
200	0,511914	0,00444	0,00227

208	0,493961	0,00449	0,00222
216	0,476399	0,00455	0,00217
232	0,442551	0,00466	0,00206
240	0,426263	0,00471	0,00201
248	0,410451	0,00476	0,00195
256	0,395028	0,00481	0,00190
260	0,387477	0,00483	0,00187
264	0,38007	0,00486	0,00185
288	0,3377	0,00500	0,00169
320	0,287021	0,00517	0,00144
328	0,275326	0,00521	0,00143
368	0,222618	0,00541	0,00120
432	0,156016	0,00570	0,00089

Tableau III.5 : Calculs de la fiabilité, du temps de défaillance et de la densité de probabilité.

Les présentations graphiques de la fiabilité, de la densité de probabilité et du temps de défaillance sont illustrées par les figures suivantes (Figure III.2, III.3 et III.4)

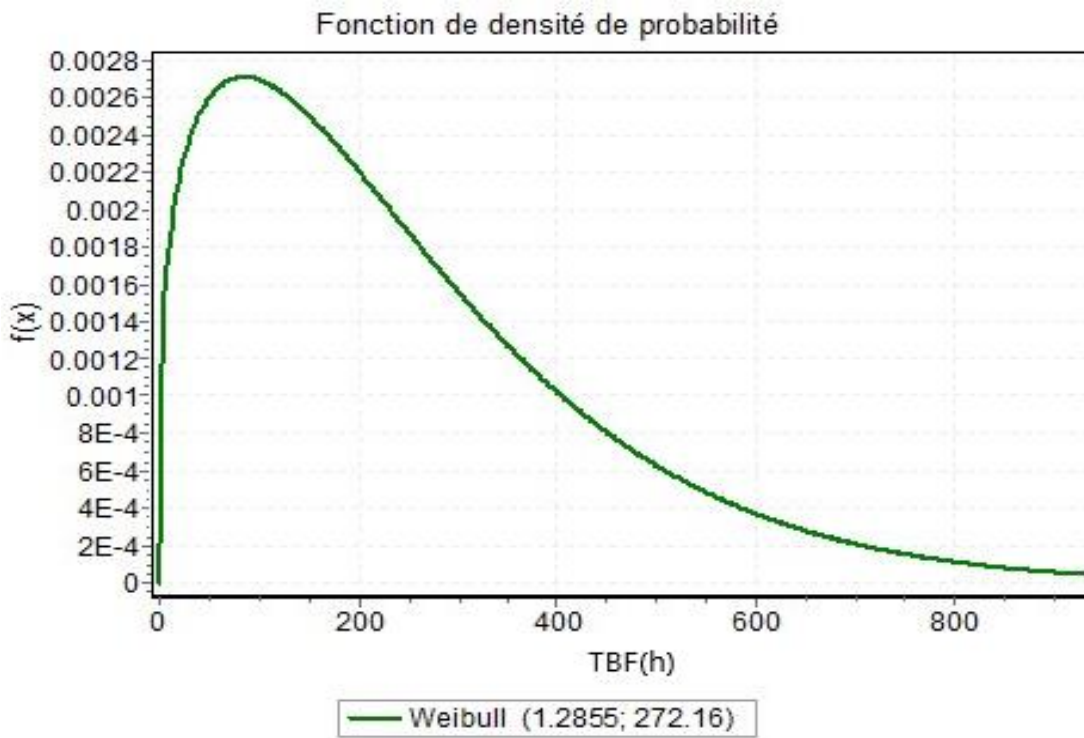


Figure III.3 : Densité de probabilité $f(t)$.

La Figure. III.3 présente la densité de probabilité $f(t)$ en fonction du temps de bon fonctionnement (TBF).

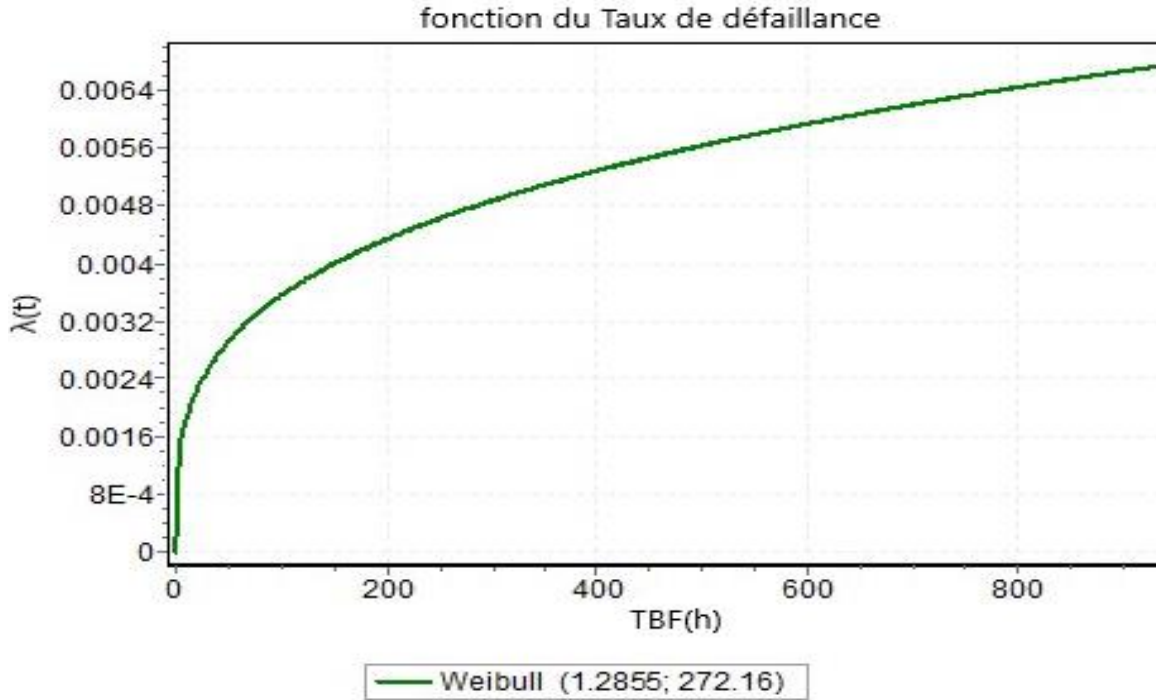


Figure III.4 : Taux de défaillance $\lambda(t)$.

La Figure. III.4 présente le Taux de défaillance $\lambda(t)$ en fonction du temps de bon fonctionnement (TBF).

III.3.1.3. Calcul de R (MTBF)

Pour la moyenne de temps de bon fonctionnement $MTBF = 227,4h$, la fiabilité est de :

$$R(MTBF) = e^{-\left(\frac{MTBF}{\eta}\right)^\beta} \quad (III.1)$$

$$R(MTBF) = e^{-\left(\frac{227,4}{270,66}\right)^{1,325}} = 0,4520$$

On voit que la fiabilité de notre machine choisie est réduite.

III.3.1.4. Calcul de F(MTBF)

La fonction de répartition pour la moyenne du temps de bon fonctionnement est :

$$F(MTBF) = 1 - e^{-\left(\frac{MTBF}{\eta}\right)^{1,325}} \quad (III.2)$$

$$F(MTBF) = 1 - e^{-\left(\frac{227,4}{270,66}\right)^{1,325}} = 0,5448$$

III.3.1.5. La densité de défaillance f (MTBF)

La densité de défaillance correspondante à la moyenne du temps de bon fonctionnement est :

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-y}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-y}{\eta}\right)} \tag{III.3}$$

$$f(x) = \frac{1,325}{270,66} \left(\frac{227,4}{270,66}\right)^{1,325-1} \cdot e^{-\left(\frac{227,4}{270,66}\right)} = 0,00209$$

III.3.1.6. Calcul de λ(MTBF)

Le taux de défaillance en fonction de moyenne du temps de bon fonctionnement est :

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-y}{\eta}\right)^{\beta-1} \tag{III.4}$$

$$f(x) = 0,00462$$

III.3.2. La maintenabilité

La fonction de maintenabilité est donnée par la relation suivante:

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \tag{III.5}$$

Le taux de réparation μ est exprimé par:

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \tag{III.6}$$

Avec $MTTR = \frac{\Sigma TTR}{N^{\circ}} = 37,75$

$$\mu = 0,26 h^{-1}$$

Le tableau ci-dessous résume la maintenabilité pour l'historique des pannes précédent.

N°	Temps de Réparation (h)	M(t)
01	04	0,100
02	06	0,146
03	07	0,169
04	09	0,212

05	10	0,232
06	10	0,232
07	12	0,272
08	14	0,309
09	16	0,345
10	17	0,362
11	18	0,379
12	30	0,548
13	44	0,688
14	45	0,696
15	50	0,734
16	66	0,826
17	87	0,900
18	90	0,907
19	100	0,929
20	120	0,958

Tableau III.6 : le calcul de la maintenabilité.

Le tableau III.6 permet de présenter la fonction de maintenabilité en fonction des temps de réparation comme illustré la figure suivante.

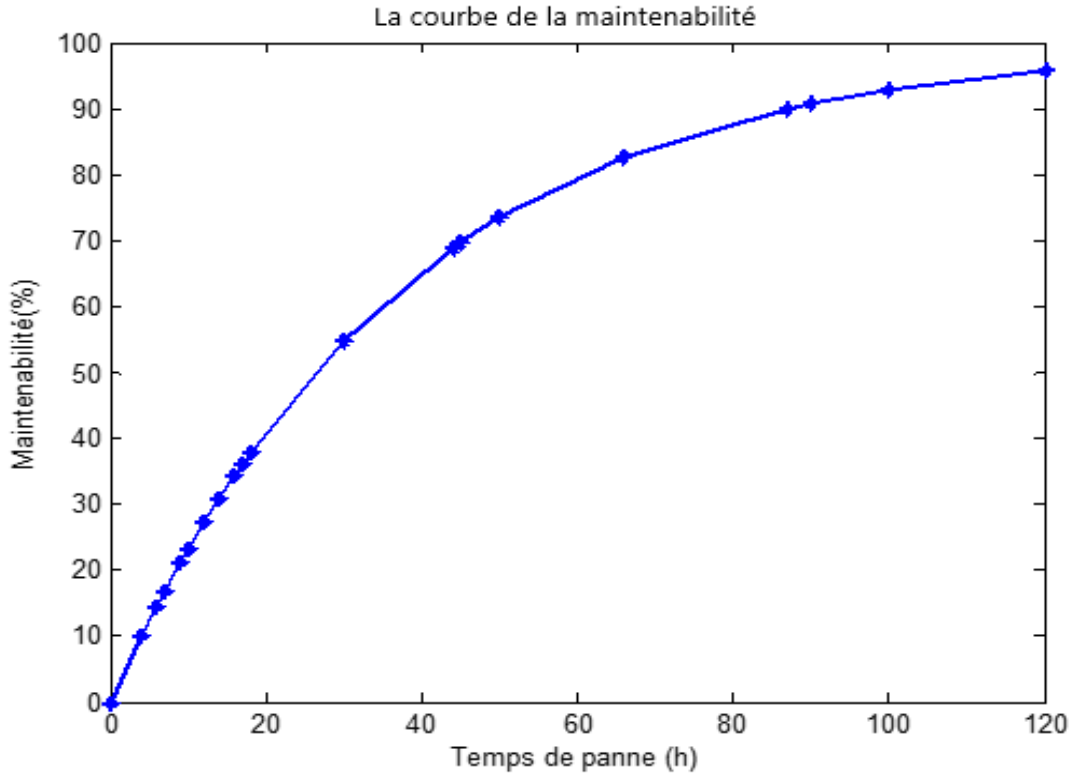


Figure II.5 : La Courbe de Maintenabilité.

La figure. III.5 montre la maintenabilité en fonction des temps de réparation (TTR), on remarque d’après cette figure que la maintenabilité augmente avec l’augmentation du temps de réparation (TTR).

III.3.3. La disponibilité

III.3.3.1. Disponibilité intrinsèque théorique

On peut calculer la disponibilité intrinsèque théorique par l’équation suivante :

$$D = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (III.7)$$

Avec MTBF= 227,4

$$D = \frac{227,4}{227,4 + 37,75} = 0,857 = 85,7 \%$$

MTTR=37,75

III.3.3.2. La disponibilité instantanée

La disponibilité instantanée en fonction du taux de défaillance et du taux de réparation est exprimée comme suit :

$$D(t) = \frac{\mu}{(\mu+\lambda)} + \frac{\lambda}{(\mu+\lambda)} e^{-(\lambda+\mu)t} \quad (\text{III.8})$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{1}{MTBF} = 0,00439$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} = 0,0264$$

Le tableau suivant résume les calculs de la disponibilité intrinsèque :

N°	Temps de Réparation (h)	D(t)
01	04	0,9833
02	06	0,9758
03	07	0,9722
04	09	0,9654
05	10	0,9621
06	10	0,9621
07	12	0,9558
08	14	0,9499
09	16	0,9444
10	17	0,9418
11	18	0,9392
12	30	0,9139
13	44	0,8941
14	45	0,8930
15	50	0,8879
16	66	0,8760

17	87	0,8671
18	90	0,8663
19	100	0,8639
20	120	0,8614

Tableau III.7 : Tableau de disponibilité instantané.

Les résultats de calculs de la disponibilité intrinsèque sont illustrés par la figure suivante :

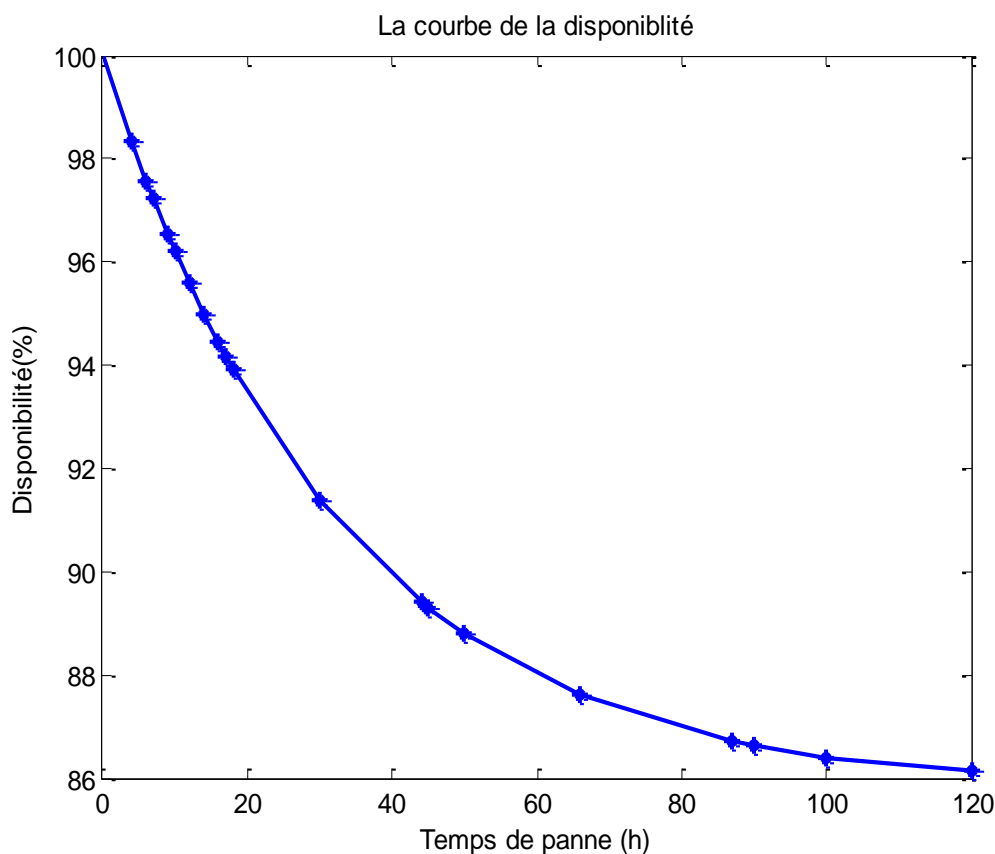


Figure III.6 : La Courbe de disponibilité instantanée.

La figure III.6 montre la disponibilité intrinsèque en fonction du temps de réparation. D'après cette figure, on remarque que la disponibilité diminue avec l'augmentation du temps de réparation.

III.4. Amélioration de la fiabilité par la Méthodes d'analyse de défaillances

- ❖ Calcul du temps de bon fonctionnement souhaitable pour améliorer la fiabilité à 70%

$$R(t) = 70\% \Rightarrow t = ?$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \Rightarrow \ln R(t) = -\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta = \ln(0,07) \Leftrightarrow -[\ln(R(t))] \frac{1}{\beta} = \frac{t}{\eta}$$

$$\Rightarrow t = -\eta[\ln(R(t))] \frac{1}{\beta} \Rightarrow t = 543,21 \text{ h}$$

Pour évoluer la fiabilité de la machine Aléuseuse Fraiseuse (l'entreprise MEI) à une fiabilité égale à 70%, il faut proposer un plan préventif systématique additionnel pour les éléments les plus défaillant, pour cela; on va utiliser la méthode ABC pour extraire ces éléments.

III.4.1. L'application pratique de la méthode d'analyse de défaillances ABC

L'objectif de la méthode ABC est de classer les défaillances et extraire les éléments les plus défaillants, le tableau III.9 montre les données pour tracer la courbe ABC

III.4.2. La courbe ABC

À l'aide du tableau III.9, on peut utiliser les pourcentages du cumul de temps de panne et du cumul de nombre de panne pour tracer la courbe ABC.

N°	Type de panne	Temps d'arrêt (h)	Cumul (T-R)	% (T-R)	Number de panne	Cumul Nombre de panne	% Nombre de panne
01	Réparation de la tabelle panne électrique	120	120	15,89	1	1	5
02	panne de servomoteur	100	220	29,13	1	2	10
03	la broche ne tourne pas	90	310	41,05	1	3	15
04	panne de la broche ne tourne pas	87	397	52,58	1	4	20
05	panne de pompe hydraulique du travail vertical	66	463	61,32	1	5	25

06	Arrêt du mouvement de l'axe Z	50	513	67,94	1	6	30
07	panne an niveaux d'axe Z	45	558	73,90	1	7	35
08	panne d'axe X	44	602	79,73	1	8	40
09	bruit anormale donne la broche	30	632	83,70	1	9	45
10	panne d'axe X	18	650	86,09	1	10	50
11	fuite d'huile au niveau du bac de la pompe hydraulique	17	667	88,34	1	11	55
12	panne de servomoteur	16	683	90,46	1	12	60
13	panne le changement du broche)	14	697	92,31	1	13	65
14	panne d'axe Y	12	709	93,90	1	14	70
15	Réparation de la panne électrique	10	719	95,23	1	15	75
16	sou de tirage	10	729	96,55	1	16	80
17	panne de table d'alésage	09	738	97,74	1	17	85
18	panneau d'commande fonction pas	07	745	98,67	1	18	90
19	Réparation de panne électrique	06	751	99,47	1	19	95
20	fuit d'huile au niveau du pressostat	04	755	100	1	20	100

Tableau III.8 : les données pour tracer la courbe ABC.

La Figure suivante montre la courbe ABC qui contient trois zones :

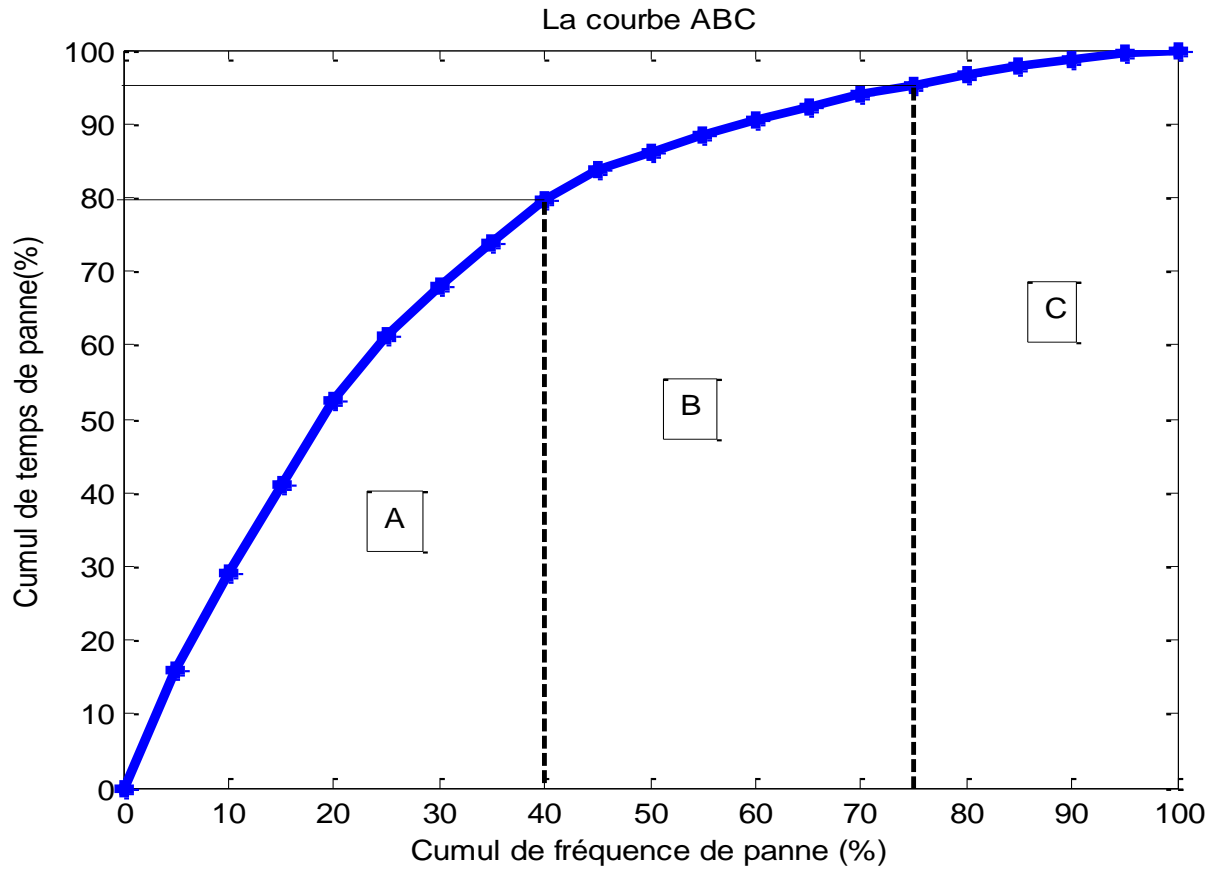


Figure III.7 : La courbe ABC.

III.4.2.1. Interprétation des résultats

- ❖ **Zone "A"**: on voit que d'après cette zone qu'environ de 40 % des pannes représente 79.94 % des heures d'arrêts, cette zone contient les éléments les plus défectueux (Réparation de la tablette panne électrique et panne de servomoteur, la broche ne tourne pas, panne de la broche ne tourne pas, panne de pompe hydraulique du travail vertical, Arrêt du mouvement de l'axe Z, panne au niveau d'axe Z, panne d'axe X).
- ❖ **Zone "B"**: Dans cette zone, les 35% des pannes représentent 16.06% des heures d'arrêts, c'est une zone qui contient des éléments moins de temps d'arrêt par comparaison avec les éléments de la zone A (bruit anormal de la broche, panne d'axe X, fuite d'huile au niveau du bac de la pompe hydraulique, panne de servomoteur, panne de changement de broche, panne d'axe Y, Réparation de la panne électrique).
- ❖ **Zone "C"**: Dans cette zone les 25% des pannes restantes ne représentent que de 4% des heures d'arrêts.

Pour améliorer le temps de bon de fonctionnement, il doit minimiser le temps de panne des éléments de la zone A (les éléments les plus défaillants) par une proposition d'un plan de maintenance préventif additionnel concernant ces éléments d'une part et l'utilisation de la technique de l'analyse vibratoire d'une autre part pour surveiller ces éléments et détecter leurs défauts dans un stade précoce. Ces propositions permettent de réduire le temps de panne, augmenter le temps de bon de fonctionnement et améliorer la fiabilité à la valeur souhaitée (0.7).

III.5. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons pris les TBF de la machine choisie puis calculé la fonction de répartition réelle et théorique à pour but de choisir la méthode convenable pour estimer la fiabilité de cette machine. La maintenabilité et la disponibilité a été calculé et pour améliorer la fiabilité et la disponibilité, il doit augmenter le temps de bon fonctionnement et minimiser le temps d'arrêt par une proposition d'un plan de maintenance préventif additionnel.

Conclusion générale

Conclusion Générale

La gestion optimale d'une machine tout au long de sa durée de vie, de la conception au démantèlement, passe par la recherche d'un compromis entre des objectifs souvent conflictuels. On distingue d'une part les performances économiques : coûts et bénéfices, et d'autre part les aspects de fiabilité, de disponibilité, de la sécurité des personnes et de la sûreté des installations. Pour apporter des éléments d'aide à la décision face à ce problème, il est nécessaire de disposer d'outils et méthodes permettant d'analyser les installations industrielles et d'évaluer quantitativement leurs performances en termes de maintenance, tout en respectant les contraintes économiques.

Dans notre travail, nous avons choisi une machine de rôle important dans l'entreprise MEI qui s'appelle Aléseuse Fraiseuse. On a extrait leur historique de pannes pour calculer la fiabilité de cette machine.

D'après l'historique de panne de Aléseuse Fraiseuse, nous avons extrait les temps de bon fonctionnement (TBF) à travers les temps de panne et le mode d'emploi de l'Aléseuse Fraiseuse. Le nombre de TBF calculés, nous a aidés de choisir la relation de la fonction de répartition théorique convenable, ensuite pour extraire les paramètres de la loi de Weibull, nous avons utilisé le logiciel EasyFit. Ces paramètres permettent de calculer la fonction de répartition réelle. Ces deux fonctions de répartition ont pour but de savoir la loi de calcul acceptée pour évaluer la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité par l'utilisation de test de Kolmogorov Smirnov.

A partir de ce test, nous avons constaté que la loi de Weibull est acceptée pour calculer les paramètres de la sûreté de fonctionnement. L'évaluation de la fiabilité a montré qu'elle est réduite ce qui nous oblige de tracer la courbe ABC pour extraire les éléments les plus tombent en panne, et nous avons traité les problèmes de ces éléments pour évoluer le temps de bon fonctionnement et augmenter la fiabilité de l'Aléseuse Fraiseuse.

Dans les travaux futurs, nous allons améliorer le niveau de la sûreté de fonctionnement des systèmes électromécaniques par l'application des techniques de la maintenance préventive conditionnelle, telle que l'analyse vibratoire, l'analyse des bruits, l'analyse des huiles et la thermographie.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **ANTER LEBIDI**, « Développement de la production d'un système électromécanique par une proposition d'une politique de maintenance efficace » Mémoire de Master en génie électrique, université de M'sila, 2014.
- [2] **Benaïcha, Halima**. Analyse des stratégies de maintenance des systèmes de production industrielle. Diss. University of sciences and technology in Oran, 2015.
- [3] **Alhouaij, Ahmad Alali**. Contribution à l'optimisation de la maintenance dans un contexte distribué. Diss. 2010.
- [4] **TOUAMA Elhadj**, « Evaluation des performances de la maintenance des systèmes de production » Mémoire de Master en génie électrique, université de M'sila, Juin 2014.
- [5] **Negadi Ali**, « la maintenance des Equipements de forage (CAS TP127 HASSI MESSAOUD) » Mémoire de master génie mécanique, université ABDOU BEKR BELKAID-TLEMEN, juin 2014
- [6] **ASBAI Samir**, «Evaluation des caractéristiques de la sûreté de fonctionnement d'une turbine à gaz» Mémoire de Master en Génie Mécanique, Université de Bejaïa, 2017
- [7] **DAFDAF Abd Elhak et FAID Omar**, «Optimisation de la fiabilité d'un système électromécanique» Mémoire de Master en génie électrique, université de M'sila, 2018
- [8] **BEN DJAAFER Ahmed**, «Réalisation d'un plan de maintenance préventive systématique pour l'amélioration de la sûreté de fonctionnement d'un système électromécanique» Mémoire de Master en génie électrique, université de M'sila, 2013
- [9] **LLAURENS Jérémy**, « Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique » Thèse présentée pour l'obtention du titre de docteur en pharmacie diplôme d'état, université Joseph Fourier, faculté de pharmacie de Grenoble, 16 Février 2011.
- [10] **HAMDAOUI Lakhdar et KHABBAR Hocine**, «Etude analytique de la maintenance préventive d'un compresseur à vis- ATLAS COPCO GA15-» Mémoire de Master en Génie Mécanique, Université de Ouargla, 2018
- [11] **BELOUADAH Abdenaceur**, «Amélioration de la fiabilité d'un système électromécanique par l'utilisation des opérations de la maintenance préventive» Mémoire de Master en génie électrique, université de M'sila, 2016
- [12] **ISSET Nabeul** , cours ; Introduction à la maintenance 2013/ 2014

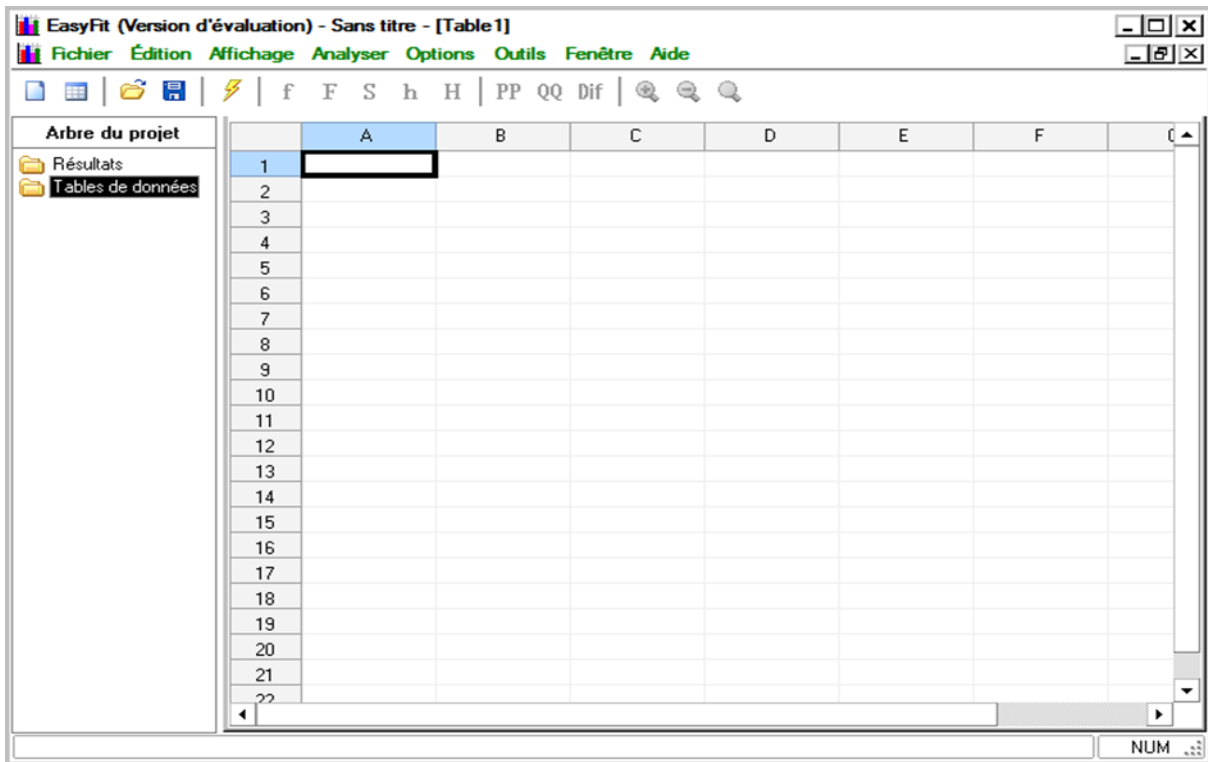
- [13] [http://erwan.neau.free.fr/Toolbox/Diagramme d ISHIKAWA.htm](http://erwan.neau.free.fr/Toolbox/Diagramme%20d%20ISHIKAWA.htm)
- [14] "**Manuel de maintenance**", NAPHTOGAZ, HMD, (2001).
- [15] **HATHAT Abdelkader, DEBLAOUI Hicham**, Mémoire (Etude analytique FMD d'une turbine DR 990) université Kasdi Merbah, Ouargla 2014/2015.
- [16] **A.villemeur** suereté de fonctionnement de systèmes industriel: fiabilité, facteurs humains, informatisation eyrolles, paris 1988
- [17] **Mathieu.G**, « Modélisation des coûts de cycle de vie prévision des coûts de maintenance et de la fiabilité Application à l'aéronautique», Thèse de doctorat d'Ecole centrale de Lyon ,2005.
- [18] **Olivier.B, Pierre. D**, « Modélisation de fiabilité d'un system doumis a des sollicitations variables», Faculté Polytechnique de Mons, Service de Génie Mécanique Rue du Joncquois, 53 à B7000 Mons, Belgique 2007.
- [19] **Alin.G**, « Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécaniques application sur système embarque », Thèse de doctorat d'université d'angers, 2007
- [20] **NICOLAS TERRIER**, « la maintenance», domaine universitaire 38041 grenoble cedex 9 année 2002 .
- [21] **BOUANAKA MOHAMED LARBI**, « contribution a l'amélioration des performances opérationnelles des Machines industrielles » Mémoire de magister, université de Constantine 2008
- [22] **Jean .B** « la TPM : un système de production » Technologie (SCEREN - CNDP) – Revue Française de gestion Industrielle, Paris, avril 2008.
- [23] Catalogue général des profils mai 2010.
- [24] **S. Butdee et al.** CaseXPert A Process Planning System with Feature Based Neural Network Search Strategy for Aluminum Extrusion Die Manufacturing. 2008
- [25] **A. Benouareth**. Contribution `a l`étude de la fiabilit`e des postes de distribution ´electrique (application des processus semi-markoviens). Th`ese de Magister, Universit´e M`Hamed Bougara de Boumerdes, 2005.

Annexes

Annexe A : Introduction to EasyFit 5.6

EasyFit : Logiciel d'ajustage de distributions

EasyFit permet d'ajuster automatiquement les distributions aux données échantillon et de sélectionner le meilleur modèle en secondes. Il est conçu de façon à rendre l'analyse des données aussi facile que possible, laissant en coulisse les détails techniques compliqués et vous



permettant ainsi de vous concentrer sur les objectifs de vos affaires.

Figure A : Interface de logiciel EasyFit

Avantages d'EasyFit :

- fait gagné du temps : réduit votre temps d'analyses de 70-95% par rapport aux méthodes manuelles
 - fait gagner de l'argent : empêche les erreurs d'analyses et vous aide à prendre de meilleures décisions
 - assure la haute qualité de vos projets
 - facile à apprendre et utiliser : ne demande que les connaissances de base de la statistique EasyFit
- : Fonctionnalités

EasyFit permet de sélectionner facilement et rapidement la distribution de probabilités la mieux adaptée aux données. Ses fonctions clés comprennent :

- prise en charge de plus de 55 distributions
- mode d'ajustage de données puissant et automatisé
- possibilité d'ajustage manuel de distributions
- graphiques interactifs
- tests de qualité d'ajustage

L'environnement intégré fourni par EasyFit comprend gestion de données, analyse et possibilités d'afficher des rapports qui vous permettent d'organiser votre travail et le rendre plus productif.

Ses nombreuses fonctions uniques font de cet outil puissant d'analyse de données une solution très flexible. Avec EasyFit vous pouvez :

Analyser vos groupes de données même s'ils sont très grands développer de meilleurs modèles en appliquant des distributions avancées prendre de bonnes et rapides décisions avec des rapports hypertextes

De plus, EasyFit permet de visualiser des graphiques de distributions et d'explorer leurs propriétés sans entrer les données, de générer des nombres aléatoires, de calculer les statistiques descriptives etc.

The latest version of EasyFit can be downloaded from
<http://www.mathwave.com/downloads.html>

Annexe B : Table d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov

α N	0.20	0.15	0.10	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	0.621	0.610
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	0.258	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	0.21	0.22	0.24	0.27	0.32
30	0.19	0.20	0.22	0.24	0.29
35	1.18	0.19	0.21	0.23	0.27
> 35	$1.07/\sqrt{N}$	$1.14/\sqrt{N}$	$1.22/\sqrt{N}$	$1.36/\sqrt{N}$	$1.63/\sqrt{N}$

Tableau B : Table d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov

Tableau B : Valeurs critiques de $d(n,\alpha)$, pour une taille n de l'échantillon et des niveaux de signification α .