

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



Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département d'électromécanique



Mémoire de fin d'études
En vue d'obtention du Diplôme de Master en électromécanique,
Spécialité : Maintenance industrielle

Thème :

Evaluation de la fiabilité des systèmes électromécanique

Réalisé par :

IDKI Farid

BRAHIMI Aziz

Devant le jury d'examen composé de :

M. BELGAID Hocine

Président de jury

M. OULMOUKHTAR Hand

Examineur

M^{me} BOUSSOUM Ouiza

Promotrice

Année 2022/2023

Remerciements

*Nous tenons à prier très fort et
remercier le bon Dieu tout puissant, qui par
sa volonté a fait que ce travail soit réalisé.*

*Une grand merci assez particulier à
notre encadreur Mme «**O.Boussoum**» qui
nous a énormément aidé.*

*Nous remercions tous les enseignants
du département de **Génie de construction**.*

*Nous remercions tous les personelles
de l'**société briqueterie izerkhef** Plus essentiellement*

M. Izerkhef djebar

et le groupe de maintenance.

*Enfin nous remercions tous qui on participés
dans ce travail.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*À mes très chers parents à qui je dois toutes
mes études, que Allah me les garde.*

*À mes frères, mes soeurs à qui je souhaite tout le
bonheur.*

À tous mes amis.

Résumé

Dans notre travail, on s'intéresse à L'évaluation de la fiabilité des systèmes électromécaniques qui est une étape cruciale dans le développement, la maintenance et la gestion de ces systèmes complexes. Elle vise à déterminer la probabilité que le système fonctionne sans défaillance pendant une période donnée. Et pour évaluer ces systèmes, il est essentiel de prendre en compte plusieurs facteurs. Cela inclut l'analyse des composants individuels, tels que les moteurs, les capteurs et les actionneurs, ainsi que leur interaction dans le système global. Des méthodes telles que l'analyse de la défaillance, les tests de performance et les modèles de fiabilité peuvent être utilisées pour évaluer la probabilité de défaillances et la durée de vie des systèmes électromécaniques. Une évaluation approfondie de la fiabilité permet d'identifier les points faibles potentiels et de mettre en place des mesures préventives pour améliorer la fiabilité du système.

abstrict

In our work, we are interested in the evaluation of the reliability of electromechanical systems which is a crucial step in the development, maintenance and management of these complex systems. It aims to determine the probability that the system will operate without failure during a given period. And to evaluate these systems, it is essential to take into account several factors. This includes the analysis of individual components, such as motors, sensors and actuators, as well as their interaction in the overall system. Methods such as failure analysis, performance testing and reliability models can be used to assess the probability of failures and the service life of electromechanical systems. A thorough reliability assessment helps identify potential weak points and implement preventive measures to improve system reliability.

Table des matières

Remerciement

Dédicace

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....	1
I Chapitre I : fiabilité	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 Introduction à la fiabilité.....	4
I.3 Définition de la fiabilité	5
I.4 Indicateur de fiabilité (λ) et (MTBF)	5
I.4.1 Temps moyen de bon fonctionnement.....	6
I.5 Les lois de la fiabilité	7
I.5.1 Loi exponentielle	7
I.5.2 Loi normale « Laplace-Gauss ».....	8
I.5.3 Loi de Weibull	9
I.5.4 La loi log-normale (ou de Galton).....	11
I.5.5 Loi de Gamma	12
I.5.6 Loi uniforme	12
I.6 Fiabilité des systèmes.....	13
I.6.1 Système en série	13
I.6.2 Système en parallèle	13
I.7 Maintenabilité	14
I.8 Disponibilité.....	15
I.9 Conclusion	18
II Chapitre II : Fiabilité électronique.....	19

II.1	Introduction.....	20
II.2	Enjeux Majeurs de la Fiabilité Électronique.....	20
II.3	Dégradation des Composants au Fil du Temps.....	20
II.3.1	Facteurs de Dégradation	20
II.3.2	Atténuation de la Dégradation.....	21
II.3.3	Contraintes environnementales.....	22
II.3.3.1	Types de Contraintes Environnementales	22
II.3.4	Gestion des Contraintes Environnementales	23
II.3.5	Erreurs de conception et défaillances humaines.....	23
II.3.6	Erreurs de Conception	23
II.3.7	Défaillances Humaines	24
II.4	Composants électroniques.....	24
II.5	Vue d'ensemble des composants et systèmes électroniques	26
II.5.1	Composants électroniques	26
II.5.1.1	Résistances.....	26
II.5.1.2	Condensateurs.....	26
II.5.1.3	Inducteurs	27
II.5.1.4	Diodes.....	27
II.5.1.5	Transistors	27
II.5.1.6	Portes logiques et Circuits intégrés	28
II.6	Différents composants utilisés et les mécanismes de défaillance	28
II.6.1	Résistances.....	28
II.6.2	Condensateurs.....	28
II.6.3	Inducteurs	28
II.6.4	Relais	29
II.6.5	Diodes.....	29
II.7	Rappels généraux sur les causes de défaillance des composants électroniques.....	30
II.8	Méthodologie d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes électronique	

II.8.1	Analyses fonctionnelle et organique	33
II.8.2	Analyse dysfonctionnelle	34
II.8.3	L'Analyse Préliminaire des Risques (APR)	34
II.8.3.1	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC).....	35
II.8.3.2	Arbre de Défaillance (AdD)	36
II.9	Prévision de la fiabilité des systèmes électroniques	37
II.9.1	Méthode de comptage de pièces	37
II.9.2	Méthode de contrainte partielle	38
II.10	Solutions pour une Fiabilité Accrue.....	39
II.11	Conclusion.....	40
II	Fiabilité mécanique.....	41
II.1	Fiabilité mécanique	42
II.2	Méthodes d'évaluation de la fiabilité mécanique.....	42
II.2.1	Analyse de défaillance et mode de défaillance et de leurs effets (AMDEC) :42	
II.2.1.1	Types d'AMDEC	43
II.2.2	Analyse des arbres de défaillance (FTA).....	45
II.2.3	Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (FMMEA)46	
II.2.4	Tests de vieillissement accéléré.....	47
II.2.5	Analyse de contraintes.....	48
II.2.6	Méthodes de Simulation et de Modélisation	48
II.2.7	Données de fiabilité historiques.....	48
II.2.8	Tests de durée de vie.....	49
II.3	Application de la démarche de fiabilité mécanique	49
II.4	Objectifs et intérêts de la fiabilité en mécanique	49
II.5	Spécificité de la fiabilité en mécanique	50
II.5.1	Fiabilité dans le cycle de vie d'un produit.....	50

II.5.1.1	Courbe en baignoire.....	50
II.5.1.2	Cycle de vie d'un système mécanique.....	51
II.6	Fiabilité dans le cycle de développement d'un produit.....	52
II.7	Particularité de la fiabilité mécanique.....	53
II.8	Complexité des phénomènes physiques de dégradation.....	54
II.8.1	Fatigue des matériaux.....	54
II.8.2	Rupture par fissuration.....	54
II.8.3	Fluage.....	55
II.8.4	L'usure et l'érosion.....	55
II.9	Données de fiabilité pour des composants mécaniques.....	55
II.10	Fiabilité système- Modélisation de la fiabilité des équipements mécaniques....	57
II.10.1	Procédure générale.....	57
II.11	Fiabilité de composants mécaniques spécifiques ; Méthode R-C.....	58
II.12	La place de la fiabilité en mécanique dans l'analyse de risque.....	60
II.13	Ajustement des taux de défaillance des équipements mécaniques.....	62
II.14	Conclusion.....	63
III	CHAPITRE III: description de la société et la maintenance.....	64
III.1	Présentation de la société "Briqueterie izerkhef".....	65
III.2	Chaine de production.....	66
III.2.1	Preparation.....	66
III.2.2	Extraction et stockage de matières premières.....	66
III.2.2.1	Broyage et tamisage (granulation).....	66
III.2.2.2	Malaxage et laminage.....	67
III.2.2.3	Moulage.....	67
III.2.2.4	Ligne de coupe.....	67
III.2.2.5	Séchoir.....	67
III.2.2.6	Empilage.....	67
III.2.2.7	Four Gaudí.....	67
III.2.2.8	Dépilage.....	67

III.3	Maintenance	69
III.3.1	Introduction.....	69
III.3.2	Rôles de la maintenance.....	69
III.3.3	Objectif de la maintenance.....	70
III.3.4	Classification par niveaux de maintenance.....	70
III.3.5	Type de maintenance	71
III.3.5.1	Maintenance preventive	71
III.3.5.2	Maintenance systématique	71
III.3.5.3	Maintenance corrective	72
IV	CHAPITRE IV : Analyse AMDEC.....	73
IV.1	Introduction	74
IV.2	Objective de AMDEC	74
IV.3	Type de l'AMDEC	74
IV.3.1	AMDEC Moyen de production.....	74
IV.3.2	L'AMDEC processus.....	75
IV.3.2.1	L'AMDEC produit.....	75
IV.4	Principe de la méthode	76
IV.4.1	Analyse fonctionnelle	76
IV.4.2	Analyse de défaillance	76
IV.4.2.1	Rechercher les causes de la défaillance	77
IV.4.2.2	Etude des effets	77
IV.4.2.3	Recensement des moyens de détection existant.....	77
IV.4.2.4	Hierarchisation des défaillances.....	77
IV.4.2.5	Estimation des facteurs de fréquence, gravité et non détection	77
IV.5	Determination de la criticité.....	79
IV.6	Détection des actions correctives menées	80
IV.7	Conclusion.....	80
V	Chapitre V: Analyse des défaillances des machine	81
V.1	Introduction.....	82

V.2	Étude FMD de la chaîne de production	82
V.3	Méthode ABC	82
V.4	Étude de fiabilité	83
V.5	Étude de maintenabilité.....	87
V.6	Étude de disponibilité.....	91
V.7	Étude AMDEC:.....	95
V.8	Conclusion	105

Liste des figures

Figure I-1: Courbe caractéristique du taux de défaillance.....	7
Figure I-2: Principales propriétés de la distribution exponentielle	8
Figure I-3: Principales propriétés de la distribution normale.....	8
Figure I-4: Principales propriétés de la loi de Weibull	9
Figure I-5: Figure I.5 : Fiabilité	11
Figure I-6: Fonction de répartition	11
Figure I-7: Taux de défaillance	11
Figure I-8: Principales propriétés de la distribution log-normale.	12
Figure I-9: Principales propriétés de la distribution Gamma.	12
Figure I-10: Système série.....	13
Figure I-11: Système parallèle.....	13
Figure I-12: la maintenabilité d'un équipement.	15
Figure I-13: sûreté de fonctionnement.....	16
Figure II-1: Courbe en baignoire	26
Figure II-2: Méthodes de fiabilité utilisées durant le cycle en V.....	32
Figure II-3: Méthodologie globale pour déterminer la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques.....	33
Figure II-4: Les étapes de l'APR	35
Figure II-11: Courbe en baignoire	50
Figure II-2: Cycle de vie d'un système mécanique	52
Figure II-3: Cycle de fiabilisation d'un produit	53
Figure II-4: Méthode contrainte résistance probabiliste : Diagramme de Warmer	59
Figure II-5: Le processus d'analyse de risque tel qu'il est défini dans l'ISO 31000	61
Figure II-6: Le principe du calcul mécanique et probabiliste de la méthode contraintes-résistance.....	62
Figure III-1: localisation de la briqueterie izerkhef	65
Figure III-2: L'atelier Briqueterie izerkhef	66
Figure III-3: Chaîne de production	68
Figure IV-1: types de l'AMDEC.	74
Figure V-1: ABC de l'indisponibilité	83
Figure V-2: ABC de nombre de panne	83
Figure V-3 : Fiabilité de défilage	84

Figure V-4:Fiabilité de mouleuse.	85
Figure V-5:Fiabilité de coupeur	85
Figure V-6: Fiabilité d'empilage	86
Figure V-7:Fiabilité du séchoir.	86
Figure V-8:Fiabilité du four	87
Figure V-9:Maintenabilité de dépilage	88
Figure V-10:Maintenabilité de mouleuse.	88
Figure V-11:Maintenabilité de coupeur	89
Figure V-12:Maintenabilité d'empilage	89
Figure V-13:Maintenabilité de séchoir	90
Figure V-14:Maintenabilité de four	90
Figure V-15:Disponibilité de dépilage	92
Figure V-16:Disponibilité de mouleuse.....	92
Figure V-17:Disponibilité de coupeur.....	93
Figure V-18:Disponibilité d'empilage.....	94
Figure V-19:Disponibilité de séchoir.	94
Figure V-20:Disponibilité de four	95

Listes des tableaux

Tableau II-1: Modes de défaillance des différents composants électroniques	29
Tableau III-1: Les capacités de la Sarl BTI IZERKHEF	65
Tableau III-2: historique de panne de la briqueterie izerkhef	68
Tableau IV-1: tableau de fréquence F	78
Tableau IV-2 : tableau de la gravité G	78
Tableau IV-3: le risque de non détection	79
Tableau V-1: Méthode ABC de l'indisponibilité	82
Tableau V-2: Tableau de maintenabilité	87
Tableau V-3: tableau de disponibilité	91
Tableau V-4: AMDEC système rédacteur tapis roulant m1chμ	96
Tableau V-5: AMDEC système tapis roulant décharge	96
Tableau V-6: AMDEC cerceuse V1 et V2	97
Tableau V-7: AMDEC cerceuse V1 et V2	97
Tableau V-8: AMDEC convoyeur à rouleaux	98
Tableau V-9: AMDEC cerceuse ligne A	98
Tableau V-10:: AMDEC cerceuse ligne B	99
Tableau V-11: AMDEC Pince de défilage	99
Tableau V-12: AMDEC Séparation ligne A	100
Tableau V-13: AMDEC Séparation ligne B	100
Tableau V-14: AMDEC pince de paquetisation	101
Tableau V-15: AMDEC système tapis roulant décharge	101
Tableau V-16 : AMDEC Pompe à vide	102
Tableau V-17: AMDEC malaxeur	102
Tableau V-18: AMDEC chambre à vide	103
Tableau V-19: AMDEC chambre à vide	103
Tableau V-20: AMDEC moule.	104
Tableau V-21: AMDEC chambre à vide	104

L'évolution et la complexité des systèmes de production ainsi que la nécessité de produire rapidement et efficacement, contraignent les fabricants de construction à organiser des ateliers de service, en particulier, ils ont développé de nouveaux concepts d'organisation et de nouvelles manières d'intervenir dans les structures de production par rapport aux produits fabriqués. Aujourd'hui, la maintenance ouvre la voie à la maintenance. Ce changement n'est pas seulement dans le changement de nom, mais aussi dans le cas ou complet de la façon de faire et de penser à la soi-disant maintenance et à ce qu'on appelle aujourd'hui (la maintenance).

Ce service structuré comprend des électriciens, des mécaniciens, des ingénieurs électriciens, des ingénieurs en automatisation et d'autres industries.

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'amélioration de la sécurité opérationnelle de la chaîne de production au niveau de l'entreprise de briques izerkhef. Ce travail se compose de 5 chapitres.

Chapitre 1 : introduction à la fiabilité (définition, déférentes lois utilisées, les systèmes ; série et parallèle, etc.).

Chapitre 2 : il est divisé en deux parties, la première partie la fiabilité électronique, dont en explorant (les enjeux complexes, les composants, les méthodologies utilisées) .Et dans la deuxième partie on 'a traité la fiabilité mécanique, sa définition et son rôle dans des nombreux domaines. Par la suite, nous avons montré les différentes méthodes d'évaluation et d'amélioration d'un système ou d'un produit, ainsi les modes de défaillances.

Chapitre 3 : Ce chapitr présente une description générale de l'entreprise (fiche technique, historique de l'entreprise IZERKHEF, etc.). Par la suite on à identifier la Maintenance (définition, différentes formes,rôles, etc.), pour étudier les paramètres de sécurité opérationnelle (fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité).

Chapitre 4 : la description de la partie théorique de la méthode AMDEC

Chapiter 5 : nous avons réalisé une analyse qualitative des organes de la chaîne de production (coupe, empilage, dépilage), étudiant la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité, ainsi que les pannes des compresseurs AMDEC et leurs causes et effets.

La maintenance est une fonction commerciale déroutante et parfois négligée par les décideurs qui sous-estiment son impact. Cependant, il devient de plus en plus un élément de plus en plus sensible des opérations commerciales. Il est donc important de faire savoir aux gens. La sécurité opérationnelle est un paramètre exprimé par certaines caractéristiques spécifiques de la sécurité des équipements et des personnes.

A travers ce chapitre, nous expliquons différents aspects de ces paramètres, que nous utiliserons dans la partie pratique de ce travail.

Chapitre I : fiabilité

I.1 Introduction

La fiabilité des installations est un ensemble de propriétés d'un système qui permet à ses utilisateurs de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur délivre. Dans ce chapitre, nous présentons en premier lieu l'introduction à la fiabilité et la définition, après nous passons en revue les lois de la fiabilité et les indicateurs, ensuite la fiabilité des systèmes.

I.2 Introduction à la fiabilité

La théorie de la fiabilité sert à étudier l'aptitude du système à fonctionner correctement durant une période donnée. Un dispositif peut se trouver dans l'un des deux états suivants :

- Apte à fonctionner correctement, c'est-à-dire en état de service.
- Inapte à fonctionner correctement, c'est-à-dire en panne ou hors-service nous posons des hypothèses suivantes :

- Au départ, chaque dispositif est en état de service.
- Les défaillances se produisent généralement de façon aléatoire.

Nous définissons la fiabilité d'un dispositif pour une durée donnée comme étant la probabilité qu'aucune défaillance ne se produise pendant cette durée.

- Étant donné que les défaillances se produisent de façon aléatoire, et afin de pouvoir traiter le concept de fiabilité, nous associons à chaque dispositif une $V.a$ non négative T représentant la durée de vie (autant jusqu'à une panne) du dispositif.
- La fiabilité du dispositif à l'instant $t \geq 0$ est la probabilité qu'il fonctionne encore à l'instant t :

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F_T(t) \in [0, 1].$$

- Comme F_T est une fonction croissante, la fiabilité $R(T)$ est une fonction décroissante.
- $R(0) = 1$ et $\lim_{t \rightarrow +\infty} R(t) = 0$

- $P(t_1 < T \leq t_2) = R(t_1) - R(t_2)$.
- La durée de vie moyenne, ou *Mean Time To Fire* (MTTF), est donné par $T = E(T)$.
- Si le système peut être réparé, on note :
 - *Mean Time Between Failures* (MTBF) : Temps moyen entre deux pannes.
 - *Mean Time To Repair* (MTTR) : Temps moyen de réparation.

- On a $MTBF = MTTF + MTTR$.

❖ Cas discret :

- $R(t) = p(T > t) = \sum_{i=t+1}^{\infty} p(i) = 1 - F_T(t) = 1 - \sum_{i=0}^t p(i)$
- $T = E(T) = \sum_{i=t+1}^{\infty} p(i) = \sum_{i=0}^{\infty} R(i)$

nouveau

❖ Cas Continue :

- $R(t) = p(T > t) = \int_t^{\infty} f(s) ds = 1 - F_T(t) = 1 - \int_0^t f(s) ds$
- $T = E(T) = \int_0^{\infty} R(t) dt$

nouveau

Exemple 1 : prouver que $T = \sum_{i=0}^{\infty} R(i)$

Exemple 2 : exprimer $R(t)$ et $E(T)$ si $T \sim \text{Exp}(\lambda)$.

I.3 Définition de la fiabilité

La fiabilité et l'aptitude d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée. Elle est caractérisée par la probabilité $R(E)$ 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.

$$R(t) = \text{prob}[E \text{ non défaillante sur } [0 ; t]]$$

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

I.4 Indicateur de fiabilité (λ) et (MTBF)

Précédemment le taux de défaillance λ a été défini par des expressions mathématiques à travers un calcul de probabilité. On peut également l'exprimer par une expression physique.

Il caractérise la vitesse de variation de la fiabilité au cours du temps. La durée de bon fonctionnement est égale à la durée totale en service moins la durée des défaillances.

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

I.4.1 Temps moyen de bon fonctionnement

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

$$\mathbf{MTBF} = \int_0^{\infty} (t)$$

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

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

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

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

La courbe ci-contre du taux des défaillances pour les différents entiers

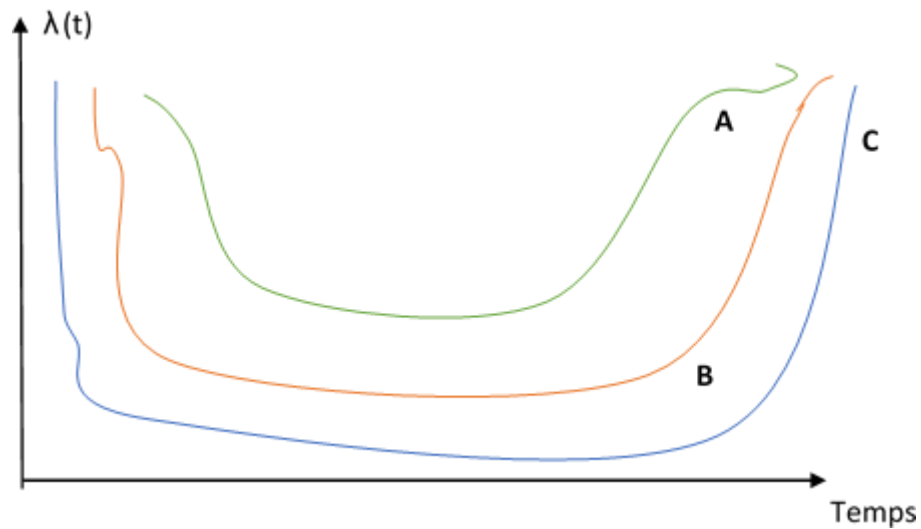


Figure I-1: Courbe caractéristique du taux de défaillance.

Les courbes du taux de défaillance ont une même forme générale dite en baignoire, mais présentent néanmoins des différences suivant la technologie principale du système étudié :

- A- en mécanique
- B- en électromécanique
- C- en électronique.

I.5 Les lois de la fiabilité

I.5.1 Loi exponentielle

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. C'est une loi simple très utilisée en fiabilité dont le taux de défaillance est constant.

Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales, les propriétés principales de la distribution exponentielle.

Désignation	Formules
Densité de probabilité	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$
Fonction de répartition	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$
Fiabilité	$R(t) = e^{-\lambda t}$
Taux de défaillance	$\lambda(t) = \lambda = C^{te}$

Espérance	$E(t) = 1/\lambda$
Variance	$\sigma^2 = 1/\lambda^2$

Figure I-2: Principales propriétés de la distribution exponentielle.

I.5.2 Loi normale « Laplace-Gauss »

La loi normale est très répandue parmi les lois de probabilité car elle s'applique à de nombreux phénomènes. En fiabilité, la distribution normale est utilisée pour représenter la distribution des durées de vie de dispositifs en fin de vie (usure) car le taux de défaillance est toujours croissant. On ne l'utilisera que si la moyenne des durées de vie est supérieure à 3 fois l'écart type. En effet, t est toujours positif, alors que la viable normale est définie de $-\infty$ à $+\infty$.

Densité de probabilité	Fonction de répartition	Fiabilité
$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2 \right]$	$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$	$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{-(t-\mu)^2}{2\sigma^2} dt$
$F(t) = \frac{1}{\sigma} \varphi \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right)$	$F(t) = \Phi \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right)$	$R(t) = \Phi \left(\frac{\mu-t}{\sigma} \right)$

Figure I-3: Principales propriétés de la distribution normale.

➤ **Taux de défaillance**

$$\lambda(t) = \frac{(t - \mu)^2}{e^{\sigma^2} \int_t^\infty e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx}$$

$$\lambda(t) = \frac{1}{\sigma} \frac{\varphi \left(\frac{t - \mu}{\sigma} \right)}{\varphi \left(\frac{\mu - t}{\sigma} \right)}$$

$\mu = (t - \mu) / \sigma$: Variable normale centrée réduite.

Pour cette variable (moyenne=0 , écart type=1), on a une densité de probabilité :

$$\varphi (\mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2}$$

Fonction de réparation :

$$\varphi (\mu) = \int_0^\mu \varphi (x)$$

I.5.3 Loi de Weibull

C'est la plus populaire des lois, utilisée dans plusieurs (électronique, mécanique,...), elle permet de modéliser en particulier de nombreuses situations d'usure de matériel, elle caractérise le comportement de système dans les trois phases de vie : période de jeunesse, période de vie utile et période d'usure au vieillissement.

Dans sa forme la plus générale, la distribution de Weibull dépend de trois paramètres suivants :

β : paramètre de forme

($\beta > 0$) ; η : paramètre

d'échelle ($\eta > 0$) ;

γ : paramètre de position ($\gamma \geq 0$).

Fiabilité	Densité de probabilité	Taux de défaillance
$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$ (t > γ)	$F(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$	$\lambda(t) \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$

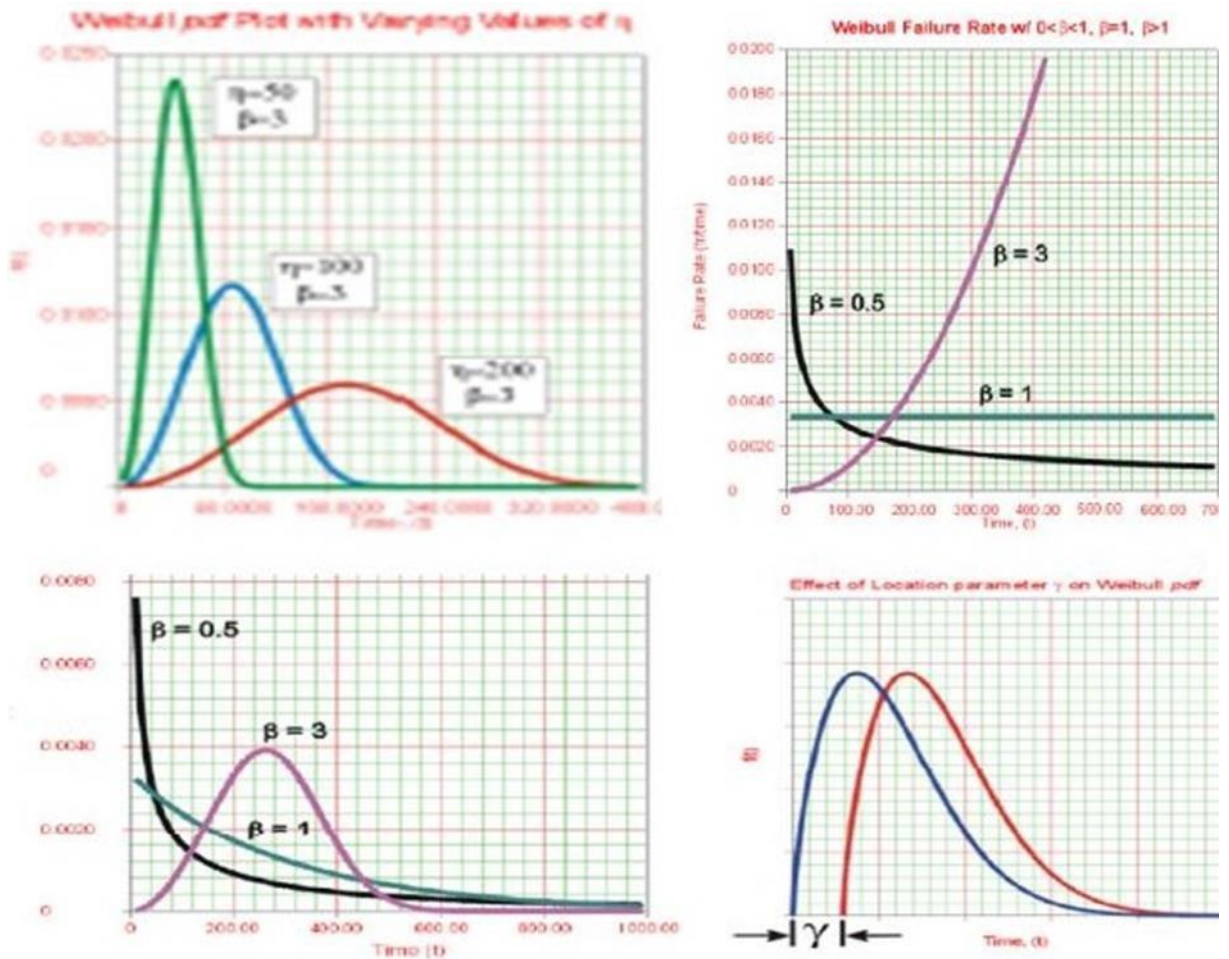
Figure I-4: Principales propriétés de la loi de Weibull.

Suivant les valeurs de β , le taux de défaillance est soit décroissant ($\beta < 1$), soit constant ($\beta=1$), soit croissant ($\beta > 1$). La distribution de Weibull permet donc de représenter les trois périodes de la vie d'un dispositif décrite par la courbe en baignoire à un certain âge γ .

Le cas $\gamma < 0$ est non défini

Le cas $\gamma = 0$ correspond à des dispositifs neufs, la formule de Weibull est dite à deux variables.

- Courbes de la distribution de Weibull



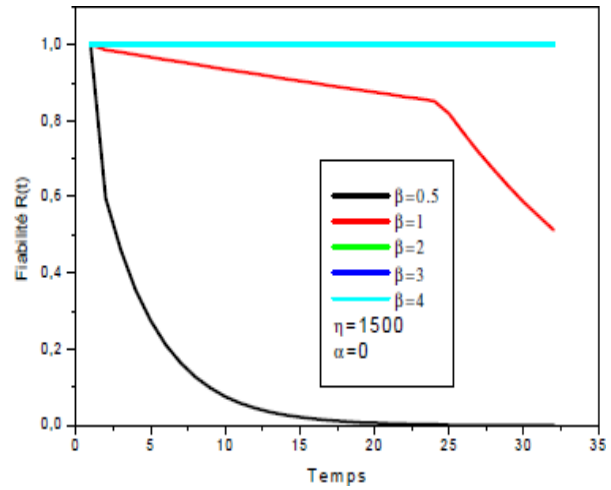
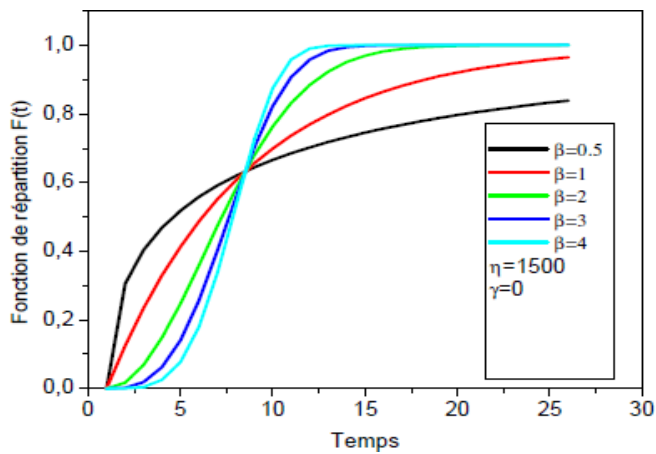


Figure I-5:Figure I.5 : Fiabilité

Figure I-6:Fonction de répartition.

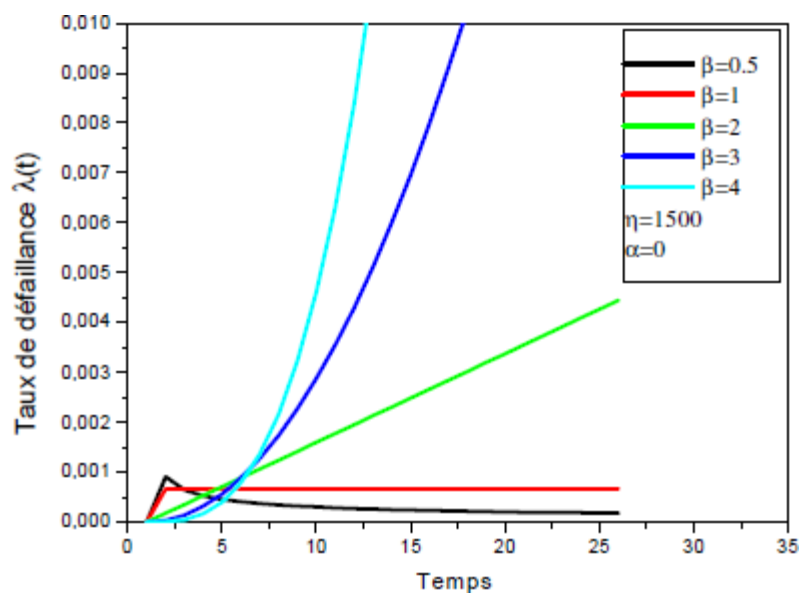


Figure I-7:Taux de défaillance.

I.5.4 La loi log-normale (ou de Galton)

Une variable aléatoire continue est positive 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 .

Fiabilité	Densité de probabilité	Taux de défaillance
$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{1nt - \mu}{\sigma}\right)^2$	$F(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{1}{2}\left(\frac{1nt - \mu}{\sigma}\right)^2}$	$\lambda(t) = \frac{e^{\frac{1}{2}\left(\frac{1nt - \mu}{\sigma}\right)^2}}{t \int_{-\infty}^{\infty} \sigma\sqrt{2\pi}F(x)dx}$

Figure I-8:Principales propriétés de la distribution log-normale.

I.5.5 Loi de Gamma

La loi Gamma est la loi de l'instant d'apparition du $\alpha^{\text{ème}}$ évènement dans un processus de poisson.

Soit $\{T_i\} = 1, 2, \dots, \alpha$, le vecteur représente la durée inter-événements (les temps entre les défaillances successives d'un système). Si ces durées sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées selon une loi exponentielle de paramètre β , alors le temps cumulé d'apparition de α défaillances suis une loi Gamma de paramètre (α, β) , sa densité de probabilité s'écrit :

Densité de probabilité	Taux de défaillance
$F(t) = \frac{\beta^\alpha t^{\alpha-1} e^{-\beta t}}{\Gamma(\alpha)}$ $\alpha \geq 0$ et $\beta \geq 0$	$\lambda(t) = \frac{\beta^\alpha t^{\alpha-1} e^{-\beta t}}{\int_0^\infty \Gamma(\alpha) F(\mu) d\mu}$ avec $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty e^{-x} x^{\alpha-1} dx$

Figure I-9:Principales propriétés de la distribution Gamma.

La loi Gamma est très utilisée dans l'approche bayésienne, elle est la conjuguée naturelle de la loi exponentielle de paramètre.

I.5.6 Loi uniforme

C'est une loi utilisée dans l'approche bayésienne pour modéliser l'avis d'experts face à une situation donnée. La densité de probabilité d'une loi uniforme sur $[0, a]$ sont données par les formules suivantes :

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{a} & \text{si } 0 \leq t \leq a \\ 0 & \text{si } t > a \end{cases}$$

Plus généralement, la distribution de probabilité d'une loi uniforme sur [a,b] s'écrit :

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{si } a \leq t \leq b \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

I.6 Fiabilité des systèmes

On désigne deux système de fiabilité :

I.6.1 Système en série

Un système en série se caractérise par l'enchaînement linéaire de **n** éléments (Figure I.3).

D'après sa structure la défaillance de l'un de ses **n** composants entraîne la défaillance du système complet car chaque élément dépend de l'élément qui le précède.



Figure I-10: Système série.

La fiabilité du système en série se calcule :

$$R(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times R_3(t) \times \dots \times R_n(t)$$

I.6.2 Système en parallèle

Un système est dit en parallèle s'il suffit qu'un seul des éléments fonctionne pour que le système fonctionne.



Figure I-11: Système parallèle.

La fiabilité résultante est donnée par :

$$R(t) = 1 - \sum_i^n (t) = 1 - (t)$$

La fiabilité du système en parallèle se calcule ainsi :

$$R(t) = 1 - [(1 - R_1(t)) \times (1 - R_2(t)) \times \dots \times (1 - R_n(t))]$$

✓ Remarque

Plus il y a des composants en parallèle, la fiabilité est meilleure.

Habituellement, on utilise cette propriété pour accroître la sécurité de fonctionnement d'un système.

✓ Exemples :

- Système en freins d'urgence sur une automobile.
- Deux pompes en parallèle.

I.7 Maintenabilité

Dans des conditions données, la maintenabilité et l'aptitude d'un bien être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données en utilisant des procédures et des moyens prescrits.

Maintenabilité = être rapidement dépanné

C'est aussi la probabilité d'un système dans des conditions de fonctionnement spécifiées, en des limites de temps désirées lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions en utilisant des procédures et des moyens prescrits.

A partir de ces définitions, on distingue :

- **La maintenabilité intrinsèque** : elle est « construite » dès la phase de conception à partir d'un cahier des charges prenant en compte les critères de maintenabilité (modularité, accessibilité ... etc).
- **La maintenabilité prévisionnelle** : elle est également « construite » mais à partir de l'objectif de disponibilité.
- **La maintenabilité opérationnelle** : elle sera mesurée à partir des historiques d'intervention.

L'analyse de maintenabilité permettra d'estimer la MTTR ainsi que les lois probalistesde maintenabilité (sur les mêmes modèles que la fiabilité).

➤ **Commentaires**

- La maintenabilité caractérise la facilité à remettre ou de maintenir un bien en bon état de fonctionnement. Cette notion ne peut s'appliquer qu'à du matériel maintenable, donc réparable.

« Les moyens prescrits » englobent des notions très diverses : moyens en personnel, appareillage, outillage, etc.

La maintenabilité d'un équipement dépend de nombreux facteurs :

Facteurs liés à l'équipement	Facteurs liés au constructeur	Facteurs lié à la main à la maintenance
- Documentation	- Conception	- Préparation et formation du personnel
- Aptitude au démontage	- Qualité d'un service après-vente	- Moyens adéquats
- Facilité d'utilisation	- Facilité d'obtention des pièces de rechange	- Etude d'améliorations (maintenance améliorative)
	- Coût des pièces de rechange	

Figure I-12:la mentabilité d'un équipement.

On peut améliorer la maintenabilité en :

- Développant les documents d'aide à l'intervention ;
- Améliorant l'aptitude de la machine au démontage (modification risquant de coûter cher) ;
- Améliorant l'interchangeabilité des pièces et sous-ensembles.

I.8 Disponibilité

La politique de maintenance d'une entreprise est fondamentalement basée sur la disponibilité du matériel impliqué dans le système de production. Pour qu'un équipement présente une bonne disponibilité il doit :

- Avoir la même possible d'arrêt de production

- Être rapidement remis en bon état s'il tombe en panne.

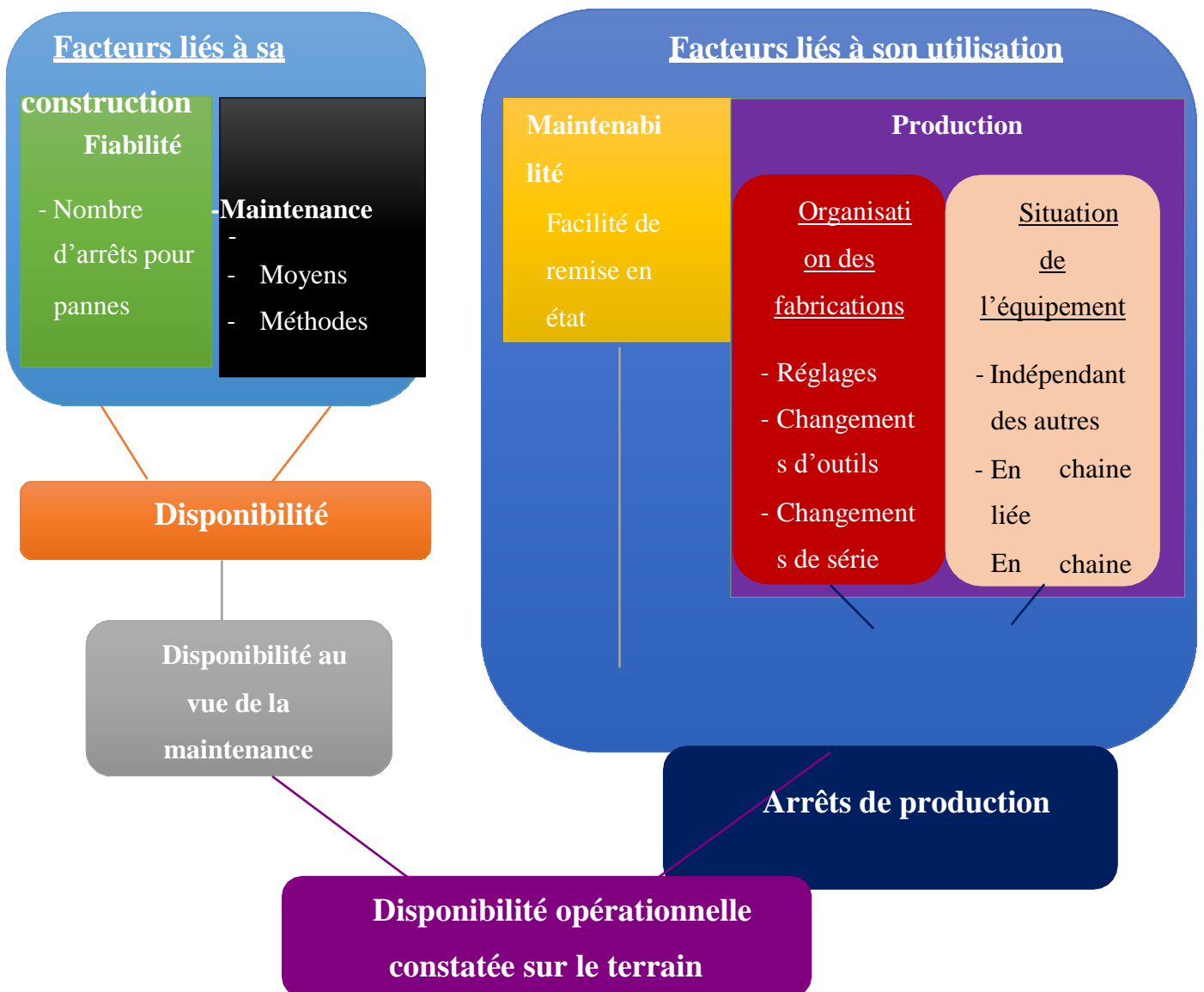


Figure I-13:sureté de fonctionnement.

La disponibilité allie donc les notions de fiabilité et de maintenabilité. Augmenter la disponibilité passe par :

- L'allongement de la MTBF (action sur la fiabilité)
- La notion de la MTTR (action sur la maintenabilité)

• **Quantification de la disponibilité**

La disponibilité peut se mesurer :

- Sur un intervalle de temps donné (disponibilité moyenne).
- A un instant donné (disponibilité instantanée).
- A la limite, si elle existe de la disponibilité instantanée lorsque $t \rightarrow \infty$ (disponibilité asymptotique).

• **Disponibilité moyenne :**

La disponibilité sur intervalle de temps donné peut-être évaluée par le rapport suivant :

$$D_0 = \frac{\text{Temps de disponibilité}}{\text{Temps de disponibilité} + \text{temps d'indisponibilité}}$$

$$\text{Ou } D_0 = \frac{TCBF}{TCBF + TCI}$$

Où :

- TCBF : Temps Cumulé de Bon Fonctionnement
- TCI : Temps Cumulé d'Immobilisation

✓ **Remarque**

Le temps cumulé d'immobilisation comprend les temps d'intervention et les temps logistiques.

En l'exprimant par rapport à des temps moyens, la disponibilité moyenne s'écrit :

$$\frac{\text{Temps moyen de disponibilité}}{\text{Temps moyen de disponibilité} + \text{temps moyen d'indisponibilité}} = \frac{TMD}{TMD + TMI}$$

En anglais: **TMD** = MUT (*Mean Up Time*)

et **TMI** = MDT (*Mean Down Time*).

✓ **Exemple**

Dans des équipements de surveillance ou de secours (tels que la surveillance d'un réacteur nucléaire, le pilote automatique d'un avion, la source d'énergie autonome d'un engin spatial), l'indisponibilité $< 10^{-3}$.

I.9 Conclusion

La fiabilité, en ce qui concerne les lois et les systèmes, est un concept essentiel dans de nombreux domaines, notamment en ingénierie, en science, en gestion de la qualité et en gestion de projet. Elle repose sur l'idée de garantir que les systèmes et les processus fonctionnent de manière cohérente et prévisible.

Chapitre II : Fiabilité électronique

II.1 Introduction

L'avènement de l'ère numérique a profondément transformé notre monde, donnant naissance à une société de plus en plus dépendante des technologies électroniques. Des appareils mobiles aux infrastructures industrielles complexes, en passant par les systèmes de communication avancés, l'électronique est omniprésente et joue un rôle essentiel dans notre vie quotidienne. Cependant, cette dépendance croissante s'accompagne d'un enjeu majeur : la fiabilité des systèmes électroniques.

La fiabilité électronique se réfère à la capacité d'un composant ou d'un système électronique à fonctionner de manière continue, précise et stable pendant une période de temps déterminée, dans des conditions variées et parfois exigeantes. Avec la sophistication croissante des technologies et la complexité des systèmes, garantir leur fonctionnement sans faille devient un défi de taille. Les conséquences d'une défaillance électronique peuvent être désastreuses, allant des pertes financières aux risques pour la sécurité des personnes et à la dégradation de la confiance des utilisateurs.

II.2 Enjeux Majeurs de la Fiabilité Électronique

La dégradation des composants au fil du temps, les contraintes environnementales, les erreurs de conception et les défaillances dues à des facteurs humains sont autant d'enjeux majeurs en matière de fiabilité électronique. L'analyse approfondie de ces enjeux permettra de mieux cerner les causes sous-jacentes des défaillances et de développer des stratégies préventives.

II.3 Dégradation des Composants au Fil du Temps

L'une des réalités incontournables en matière de fiabilité électronique est la dégradation des composants au fil du temps. Les composants électroniques, qu'ils soient semi-conducteurs, passifs ou actifs, sont sujets à des phénomènes de vieillissement et de dégradation qui peuvent influencer leur performance et leur durée de vie. Comprendre ces mécanismes de dégradation, les facteurs qui les influencent et les moyens de les atténuer est essentiel pour garantir la fiabilité à long terme des systèmes électroniques.

II.3.1 Facteurs de Dégradation

- **Fatigue Thermique** : Les cycles de chauffage et de refroidissement auxquels les composants sont soumis dans des conditions opérationnelles normales entraînent

des contraintes mécaniques sur les matériaux, provoquant une fatigue thermique. Cette déformation répétée peut engendrer des fissures et une altération des performances électriques.

- **Oxydation** : L'exposition prolongée à l'oxygène et à l'humidité peut entraîner l'oxydation des connexions métalliques, ce qui peut dégrader la conductivité électrique et causer des dysfonctionnements.
- **Effets Électriques** : Les phénomènes électriques tels que l'électromigration et la migration ionique peuvent provoquer des déplacements de matériau à l'intérieur des composants, ce qui peut altérer leur structure et leurs propriétés électriques.
- **Effets de Courant** : Les courants électriques élevés ou les surtensions peuvent provoquer des surchauffes localisées et endommager les composants, entraînant une détérioration progressive.
- **Effets Électromagnétiques** : Les champs électromagnétiques environnants peuvent causer des interférences, induire des courants parasites et perturber le fonctionnement normal des composants.

II.3.2 Atténuation de la Dégradation

notamment dans les domaines de l'environnement, de la technologie

- **Conception Robuste** : La conception des circuits électroniques doit prendre en compte les contraintes thermiques, électriques et mécaniques afin de minimiser les effets néfastes de la dégradation. L'utilisation de matériaux résistants à la fatigue et à l'oxydation peut prolonger la durée de vie des composants.
- **Gestion Thermique** : Une gestion efficace de la chaleur générée par les composants peut réduire les contraintes thermiques et prévenir les dégradations dues à la température.
- **Environnement Contrôlé** : Dans certains cas, le contrôle de l'environnement peut limiter l'exposition aux conditions qui accélèrent la dégradation, comme la température et l'humidité.
- **Tests et Surveillance** : La mise en place de tests réguliers et de systèmes de surveillance peut permettre de détecter les signes précurseurs de dégradation et de prendre des mesures préventives avant que des défaillances critiques ne se produisent.

- **Améliorations Matérielles** : La recherche continue sur les matériaux plus durables et résistants à la dégradation peut conduire au développement de composants plus fiables.

En conclusion, la dégradation des composants au fil du temps est un défi incontournable en matière de fiabilité électronique. En comprenant les mécanismes de dégradation et en adoptant des stratégies de conception, de gestion et de surveillance appropriées, il est possible d'atténuer les effets de la dégradation et d'assurer une durée de vie plus longue et plus fiable pour les systèmes électroniques.

II.3.3 Contraintes environnementales

Impacts sur la fiabilité électronique sont es contraintes environnementales jouent un rôle significatif dans la détermination de la fiabilité électronique. Les systèmes électroniques sont souvent déployés dans des environnements variés, allant des conditions climatiques extrêmes aux environnements industriels hostiles. La capacité de ces systèmes à maintenir leur fonctionnement dans de telles conditions dépend en grande partie de leur capacité à résister aux contraintes environnementales. Comprendre et gérer ces contraintes est donc crucial pour garantir une performance fiable et durable.

II.3.3.1 Types de Contraintes Environnementales

- **Température** : Les variations de température, qu'elles soient extrêmes ou cycliques, peuvent avoir un impact significatif sur les performances et la durée de vie des composants électroniques. Les hautes températures peuvent accélérer les processus de vieillissement et causer des dégradations, tandis que les températures basses peuvent provoquer des problèmes de conductivité et de fragilité des matériaux.
- **Humidité** : L'humidité peut entraîner la corrosion des connexions métalliques, la formation de court-circuits et la dégradation des matériaux isolants, ce qui peut altérer les performances des composants.
- **Vibrations et Chocs** : Dans les environnements industriels et de transport, les vibrations et les chocs mécaniques peuvent endommager les connexions, les soudures et les composants électroniques fragiles.
- **Rayonnement Électromagnétique** : Les champs électromagnétiques environnants, tels que ceux produits par les équipements de communication sans

fil, peuvent provoquer des interférences et perturber le fonctionnement normal des systèmes électroniques.

- **Pollution Chimique** : L'exposition à des produits chimiques corrosifs ou à des gaz nocifs peut causer des réactions chimiques indésirables sur les composants électroniques.

II.3.4 Gestion des Contraintes Environnementales

- **Conception Résistante** : Les concepteurs doivent intégrer des stratégies de conception adaptées aux conditions environnementales prévues, en utilisant des matériaux et des composants résistants à l'humidité, à la chaleur et aux vibrations.
- **Boîtiers et Enveloppes** : L'utilisation de boîtiers et d'enveloppes protectrices peut contribuer à isoler les composants électroniques des influences environnementales.

II.3.5 Erreurs de conception et défaillances humaines

Lorsqu'il s'agit de fiabilité électronique, les erreurs de conception et les défaillances dues à des facteurs humains sont parmi les sources les plus significatives de problèmes. Les systèmes électroniques complexes impliquent des choix de conception, de programmation et d'exploitation qui peuvent influencer considérablement leur performance, leur sécurité et leur fiabilité. Comprendre ces erreurs et défaillances est crucial pour minimiser les risques et garantir la stabilité à long terme des systèmes.

II.3.6 Erreurs de Conception

- **Conception Incomplète** : Des omissions dans la conception peuvent entraîner des fonctionnalités manquantes ou des vulnérabilités non anticipées.
- **Incompatibilités** : L'utilisation de composants incompatibles peut provoquer des erreurs de communication, de performances ou de sécurité.
- **Mauvaises Assomptions** : Les hypothèses incorrectes sur le comportement du système peuvent conduire à des conceptions inappropriées.
- **Sous-Dimensionnement** : Des composants sous-dimensionnés peuvent ne pas être capables de supporter les charges de travail attendues, entraînant une défaillance prématurée.

II.3.7 Défaillances Humaines

- **Erreurs de Programmation** : Les erreurs de code, telles que les bugs et les vulnérabilités, peuvent provoquer des dysfonctionnements et des failles de sécurité.
- **Erreurs d'Opération** : Une mauvaise manipulation des systèmes, notamment lors de la maintenance, peut causer des pannes ou des dégradations.
- **Mauvaise Gestion des Mises à Jour** : L'omission de mises à jour de sécurité ou leur mauvaise application peut exposer les systèmes à des risques.
- **Formation Insuffisante** : Un personnel mal formé peut ne pas comprendre les protocoles de fonctionnement adéquats, ce qui peut conduire à des erreurs d'exploitation.

II.4 Composants électroniques

Pour les composants électroniques la courbe, représentant le taux de défaillance, a la même allure que la courbe en baignoire (figure II-1). Elle est donc composée de trois phases nettement distinctes :

La première phase définit la période de jeunesse, caractérisée par une décroissance rapide du taux de défaillance. Pour un composant électronique cette décroissance s'explique par l'élimination progressive des défauts dus aux processus de conception ou de fabrication mal maîtrisés ou à un lot de composants défectueux. Aujourd'hui, cette période est réduite, compte tenu de la grande qualité des composants. Les distributions de probabilité utilisées pour ces conditions sont la loi de Weibull ($\beta < 1$) et la loi log normale ($\sigma > 1$).

La deuxième phase définit la période de vie utile généralement très longue. Le taux de défaillance est approximativement constant. Les pannes sont dites aléatoires, leur apparition n'est pas liée à l'âge du composant mais à d'autres mécanismes d'endommagement. Le choix de la loi exponentielle est tout à fait satisfaisant dans cette phase.

La dernière phase est la période de vieillissement, elle est caractérisée par une augmentation progressive du taux de défaillance avec l'âge du système. Cette augmentation est due aux phénomènes de vieillissement tels que l'usure, l'érosion, etc. Cette période est très nettement au-delà de la durée de vie réelle d'un composant électronique.

Les distributions de probabilité utilisées pour ces conditions sont la loi de Weibull ($\beta > 1$) et la loi lognormale ($\sigma < 1$).

Les composants électroniques présentent des mécanismes de dégradation complexes telles que les charges de surface, la polarisation, le décollement de fils de connexion, la migration métallique, l'électromigration, le défaut de silicium, ...

Les charges de surface représentent la présence de charges en surface des oxydes de grille. Ce mécanisme intervient dans la dérive de la tension de seuil.

La polarisation suppose la présence de molécules polarisables dans l'oxyde de grille. Elle entraîne la dérive de la tension de seuil.

Le décollement de fils de connexion est lié directement au processus d'assemblage et provoque souvent des courts-circuits.

La migration métallique est le déplacement des atomes du métal dans le silicium et entraîne des court-circuit ou des circuits ouverts.

L'électromigration représente le déplacement des atomes dans les couches métalliques et provoque des court-circuits.

Un défaut de silicium est provoqué par des impuretés, des défauts de structure ou bien par des états de surface et entraîne des court-circuits.

Ces modes de défaillances agissent principalement sur les caractéristiques suivantes du composant :

La tension de seuil (dérive provoquée par surcharge, perte ou inversion de charge, polarisation, ...),

Les circuits (ouverture/fermeture par impureté, défaut de structure dans le matériel, oxydation, ...).

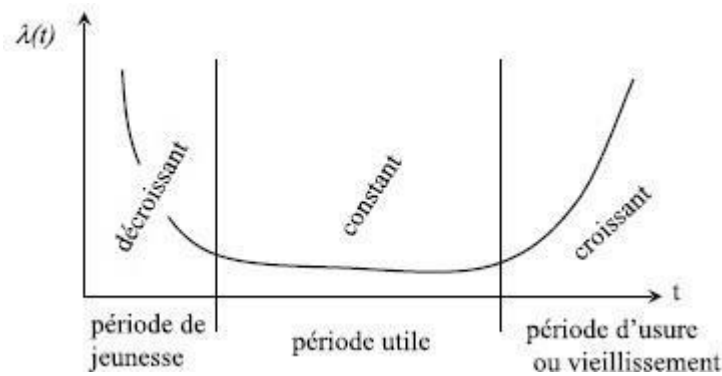


Figure II-1: Courbe en baignoire.

II.5 Vue d'ensemble des composants et systèmes électroniques

II.5.1 Composants électroniques

Un composant électronique est un élément électronique de base qui est généralement conditionné sous une forme discrète avec deux fils de connexion ou plus ou des pastilles métalliques. Les composants peuvent être emballés individuellement (par exemple, résistance, condensateur, transistor, diode) ou dans des groupes plus complexes comme des circuits intégrés (par exemple, amplificateur opérationnel, réseau de résistances, porte logique).

II.5.1.1 Résistances

Une résistance est un composant électronique passif à deux bornes qui produit une tension à travers ses bornes proportionnelles au courant électrique circulant entre elles.

Les principales caractéristiques d'une résistance sont la résistance, la tolérance (incertitude autorisée, souvent exprimée en pourcentage de résistance) et la puissance nominale (limite supérieure de la puissance du dispositif ou sa capacité à dissiper l'énergie).

Des résistances fixes ou variables sont généralement utilisées pour limiter le courant dans les circuits. Ils peuvent être intégrés dans des circuits hybrides et imprimés, ainsi que des circuits intégrés.

II.5.1.2 Condensateurs

Un condensateur (ou condenseur) est un composant électronique passif constitué d'une paire de conducteurs séparés par un diélectrique ou par le vide.

La principale propriété d'un condensateur est la capacité, le rapport de la charge électrique sur chaque conducteur à la différence de potentiel entre eux. Un condensateur idéal est caractérisé par une capacité constante unique. En pratique, le diélectrique entre les plaques passe une petite quantité de courant de fuite car tous les appareils ont une résistance finie.

Les condensateurs sont utilisés dans les circuits électroniques pour filtrer ou lisser le courant dans un circuit.

II.5.1.3 Inducteurs

Un inducteur (ou un réacteur) est un composant électrique passif qui peut stocker de l'énergie dans un circuit magnétique. Champ créé par le courant électrique qui le traverse.

La propriété principale d'un inducteur est l'inductance, qui résulte du champ magnétique qui se forme autour d'un conducteur porteur de courant qui a tendance à résister aux changements de courant.

Les inducteurs sont utilisés, souvent en conjonction avec des condensateurs et d'autres composants, pour former des circuits qui peuvent accentuer ou filtrer des fréquences de signal spécifiques.

II.5.1.4 Diodes

Sont des composants électroniques fondamentaux utilisés dans de nombreuses applications pour contrôler la direction du courant électrique. Elles permettent de laisser passer le courant dans une seule direction tout en bloquant le courant dans l'autre direction.

Les diodes sont principalement utilisées pour réaliser des rectifications (conversion de courant alternatif en courant continu), des protections contre les surtensions et les décharges électrostatiques, ainsi que pour créer des sources de lumière dans les diodes électroluminescentes (LED).

II.5.1.5 Transistors

Les transistors sont des dispositifs semi-conducteurs couramment utilisés pour amplifier ou commuter des signaux électroniques. Un transistor est constitué d'une pièce solide de matériau semi-conducteur, avec au moins trois bornes. La tension ou le

courant appliqué à une paire de bornes du transistor modifie le courant circulant via une autre paire de bornes.

II.5.1.6 Portes logiques et Circuits intégrés

Les portes logiques agissent sur une ou plusieurs entrées logiques pour produire une seule sortie logique.

Les circuits intégrés sont généralement encapsulés dans un boîtier en plastique ou en céramique et reliés via des fils d'or à broches métalliques avec lesquelles il est connecté à une carte de circuit imprimé et à d'autres composants qui font des appareils électroniques tels que des ordinateurs et des calculatrices. Les portes logiques font partie des classes de composants de base des circuits intégrés.

II.6 Différents composants utilisés et les mécanismes de défaillance

II.6.1 Résistances

Une défaillance de la résistance peut se produire en raison d'un courant ou d'une tension élevés qui entraînent un échauffement excessif des composants. Et, à mesure que l'échauffement se poursuit, la température augmente, il peut arriver que la température dépasse le point de fusion du matériau utilisé. Par conséquent, un circuit ouvert se crée. Les défauts de fabrication et les décharges électrostatiques provoquent aussi parfois des défaillances des composants.

II.6.2 Condensateurs

Les défaillances d'un condensateur en font généralement un circuit ouvert, sauf dans certains cas où il crée un court-circuit après la défaillance, comme dans le cas d'un condensateur à électrolyte. Certains condensateurs ont une polarité, de sorte que l'inversion de la polarité peut endommager le composant.

II.6.3 Inducteurs

Les inducteurs sont très susceptibles de à la défaillance en raison d'un courant excessif. Un courant élevé peut provoquer un échauffement du conducteur, ce qui peut endommager l'isolation et provoquer une défaillance. En outre, lorsqu'il y a une grande variation de courant à travers l'inducteur, le concepteur doit choisir un isolant et un matériau conducteur appropriés.

II.6.4 Relais

Les relais sont des parties très importantes de tous les circuits électriques ou électroniques point de vue de sécurité. Ils sauvent non seulement le système de tout dommage dû à certaine situation défectueuse dans le système lui-même ou de l'extérieur, mais ils s'occupent également de Les pièces qui ne seront pas vraiment affectées par ces défauts.

II.6.5 Diodes

Court-circuit : Si une diode échoue en position conductrice permanente, elle se comportera comme un court-circuit dans le circuit.

- Circuit Ouvert : Si une diode échoue en position bloquante permanente, elle ne laissera passer aucun courant dans les deux directions.

-Diminution de Performance : Au fil du temps, une diode peut voir ses performances diminuer en raison de la dégradation de ses matériaux internes. Cela peut affecter sa tension de seuil ou sa capacité à bloquer le courant inverse.

-Température Élevée : Les diodes sont sensibles aux températures élevées, qui peuvent accélérer les processus de dégradation.

Le tableau suivant résume les différents modes de défaillance de certains des composants discutés ci-dessus et leurs causes de défaillance avec une estimation des probabilités des modes de défaillance. Une liste exhaustive est donnée dans le Manuel de conception de fiabilité électronique.

Tableau II-1: Modes de défaillance des différents composants électroniques .

composants	Causes d'échec	modes de défaillance	Probabilités
Résistances : Fixé Variable	Contrainte de courant/tension élevée	Circuit ouvert	0.31
		Changement de paramètre	0.66
		Court	0.03
	Défauts de fabrication	Circuit ouvert	0.53
		Sortie erratique	0.4
		Court-circuit	0.07

Condensateurs : Électrolyte Tantale Céramique	Contrainte haute tension	Circuit ouvert	0.35
	Connexion à polarité inversée	Court-circuit	0.53
	La température peut changer la capacitance	Fuite excessive	0.1
	Distorsion dans les signaux analogiques	Changement de paramètre	0.02
Inducteurs	Contrainte à courant élevé	Distorsion d'isolement	0.7
	Faible isolation	Enroulement ouvert	0.3
	Changement soudain de courant		
Relais : Électromécanique	Génération de chaleur due à un courant élevé pendant une situation de défaut	Echec de contact	0.75
		Bobine ouverte	0.05
		Autre	0.25
Semi-conducteur dispositifs : Diodes Transistors	Contrainte à courant élevé	Court-circuit	0.1
		Circuit ouvert	0.2
		Courant inverse élevé	0.7
	Haute tension inverse	Gain faible	0.2
		Circuit ouvert	0.3
	Décharge électrostatique	Circuit ouvert	0.2
		Court-circuit	0.3
		Collecteur à haute fuite	
		Base	
Dislocation dans le silicium			

II.7 Rappels généraux sur les causes de défaillance des composants électroniques

Les causes de défaillance en électronique sont regroupées en deux classes. La première porte sur une utilisation du composant en dehors de ses spécifications. Ces contraintes sont statiques : tension, courant, température, pression, taux d'humidité...

et dynamiques : $\frac{di}{dt}$, $\frac{dv}{dt}$, gradient de température... Il faut aussi tenir compte des phénomènes de focalisation et de densité locale de courant excessive relevant de fonctionnements particuliers (blocage rapide de la diode de corps d'un MOSFET par exemple). Toutes ces contraintes importantes conduisent à un vieillissement accéléré d'origine thermo-électrique et thermo-mécanique des puces silicium et de leur report.

La genèse de cette contrainte étant très souvent d'origine externe au composant (défaut de la commande, mauvaise maîtrise ou "défaut" de l'environnement électrique).

La deuxième classe est liée au comportement du composant vis-à-vis de contraintes. En accord avec les définitions que nous avons données au début de ce paragraphe, ces causes de défaillance peuvent être dissociées en deux groupes :

Les défaillances intrinsèques et aléatoires sous faibles contraintes, liées à des mécanismes de dégradation physico-chimiques, donc indépendantes du temps (contamination ionique, particules ionisantes...).

- Les défaillances dont l'origine est un vieillissement du composant sous fortes contraintes (délamination de d'un joint brasé, décollement de bonding, électromigration...).

Méthodologies d'Évaluation de la Fiabilité :

Pour évaluer la fiabilité électronique, différentes méthodologies sont employées, allant des tests accélérés aux simulations numériques avancées. Ces méthodes permettent de prévoir la durée de vie, d'identifier les points faibles et de guider la conception et la fabrication de composants et de systèmes plus résilients.

II.8 Méthodologie d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes électronique

Notre approche est d'abord déclinée selon le cycle en V utilisé dans le développement de nouveaux produits qui peuvent être mécatroniques comme le montre la figure II-1. Les différentes phases de ce cycle (spécification, conception, réalisation, vérification et validation) sont adaptées à la thématique scientifique considérée à savoir la fiabilité et les différentes méthodes existantes sont rattachées aux phases du cycle en fonction du niveau de développement.

Nous pouvons décliner sur ce schéma deux phases pendant lesquelles la fiabilité peut être évaluée mais de manière différente et en utilisant des techniques et méthodes différentes : la phase de conception pour la fiabilité prévisionnelle et la phase de fabrication pour la fiabilité expérimentale.

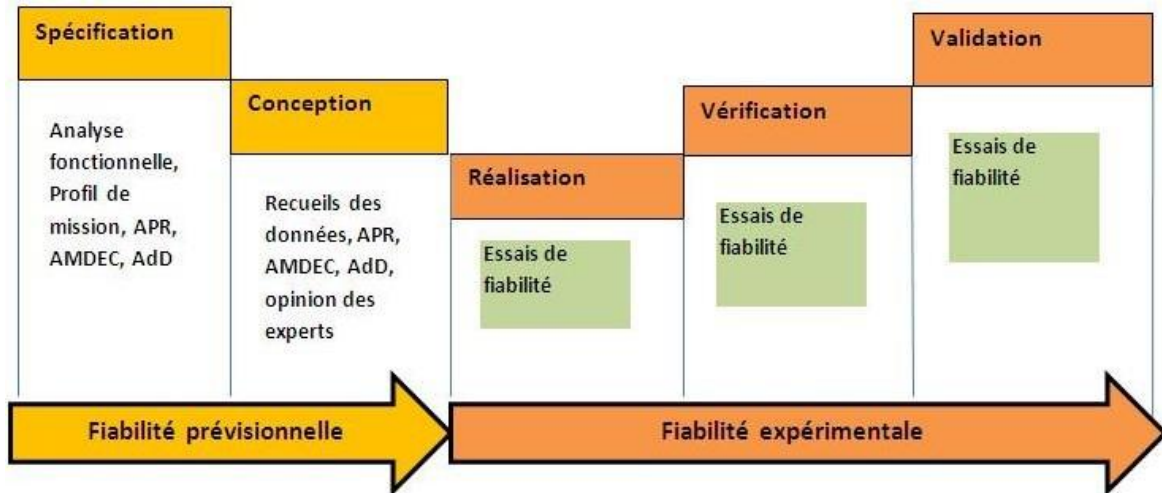


Figure II-2: Méthodes de fiabilité utilisées durant le cycle en V.

La figure II-2 présente une schématisation simplifiée de la méthodologie sur laquelle nous nous appuyons avec ses principales étapes afin d'étudier la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques

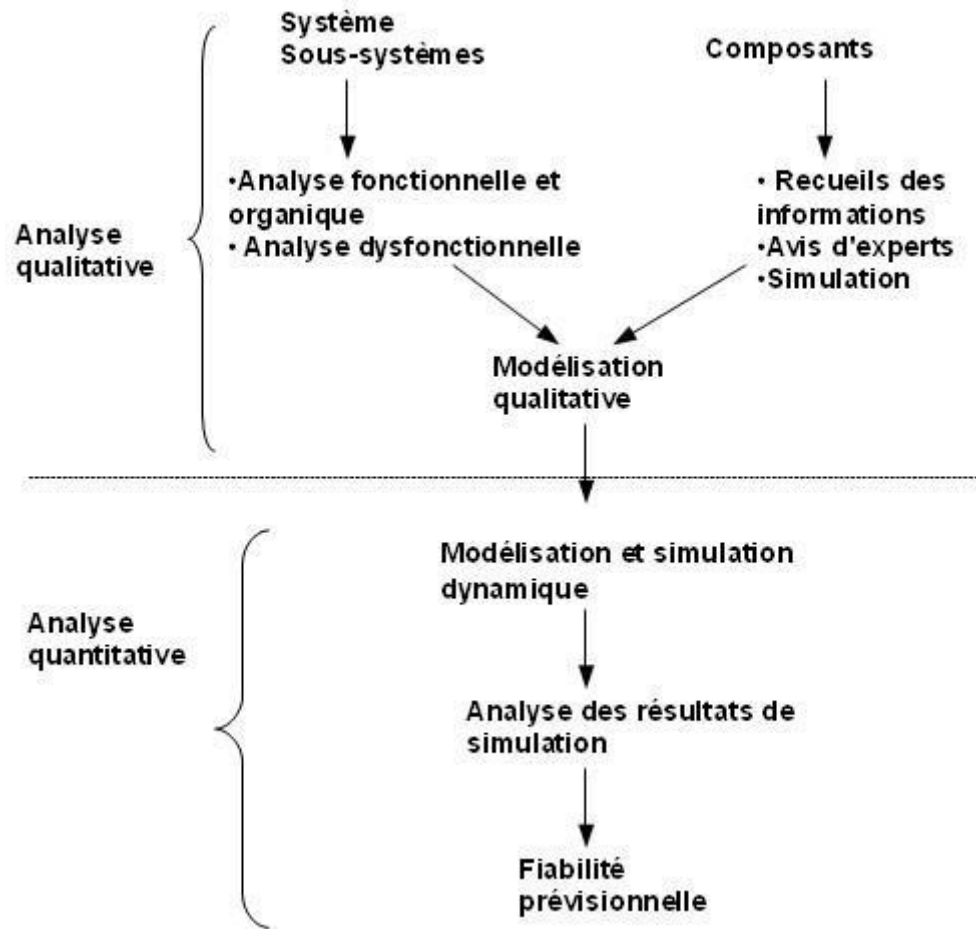


Figure II-3: Méthodologie globale pour déterminer la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques.

II.8.1 Analyses fonctionnelle et organique

L'analyse fonctionnelle permet la description des modes de fonctionnement du système étudié et des sous-systèmes identifiés ainsi que la connaissance de ses fonctions externes et internes à partir du profil de mission. L'analyse fonctionnelle est décomposée en deux parties :

- L'analyse fonctionnelle externe permet d'illustrer les relations entre le système et son milieu extérieur.
- L'analyse fonctionnelle interne a pour but de réaliser une décomposition arborescente du système en éléments

L'analyse organique permet de définir l'architecture du système avec l'ensemble des organes et composants et de leurs interfaces pour répondre aux fonctions techniques attendues. Les principales étapes pour la construction de l'architecture organique sont :

- Recherche des composants permettant de remplir les fonctions du produit et satisfaisant les exigences.
- Constitution de la matrice fonctions/composants permettant de reporter les interactions fonctionnelles listées au niveau système et au niveau de chaque composant, au travers du regroupement en organes.
- Analyse des interactions organe/organe pour déterminer les interactions entre les différents organes constituant d'une architecture primaire issue de l'analyse morphologique.
- Représentation de l'architecture organique qui permet de visualiser l'emplacement des différents composants ou organes ainsi que leurs liaisons.

II.8.2 Analyse dysfonctionnelle

L'analyse dysfonctionnelle a pour objectif d'identifier les différents modes de défaillance et de dégradation des différents composants du système et d'en voir l'effet sur le système. De plus, elle permet d'évaluer les modes de défaillance les plus critiques. Pour effectuer l'analyse dysfonctionnelle, nous avons besoin des informations obtenues suite aux analyses fonctionnelle et organique. En d'autres termes, les sorties ou les résultats des analyses fonctionnelle et organique constituent les entrées ou les bases de l'analyse dysfonctionnelle. Les principales méthodes utilisées lors d'une analyse dysfonctionnelle sont : l'Analyse Préliminaire des Risques (APR), l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC), l'Analyse des Effets des Erreurs de logiciel (AEEL), les Arbres de Défaillances (AdD), etc... . La majorité de ces méthodes s'appliquent uniquement pour la partie matérielle (composants mécaniques, électroniques, etc.).

II.8.3 L'Analyse Préliminaire des Risques (APR)

C'est une méthode généralement couramment utilisée pour l'identification d'une part des risques d'un système complexe et d'autre part pour l'évaluation de la gravité des conséquences liées aux risques. Il est recommandé de commencer l'APR dès les premières phases de la conception en utilisant toutes les données alors disponibles et de continuer à compléter cette analyse jusqu'à la fin de vie du système.

L'APR a pour objectifs :

- l'identification des dangers et de leurs causes (entités dangereuses, situations dangereuses, accidents potentiels,...) ;

- l'évaluation et l'acceptation des risques permettant une hiérarchisation ;
- la proposition de mesures propres à réduire et à contenir les risques à des niveaux acceptables.

Le principal avantage de l'Analyse Préliminaire des Risques est de permettre un examen relativement rapide des situations dangereuses dans des systèmes complexes. Par rapport aux autres méthodes présentées ci-après, elle apparaît comme relativement économique en termes de temps passé et ne nécessite pas un niveau très détaillé de description du système étudié.

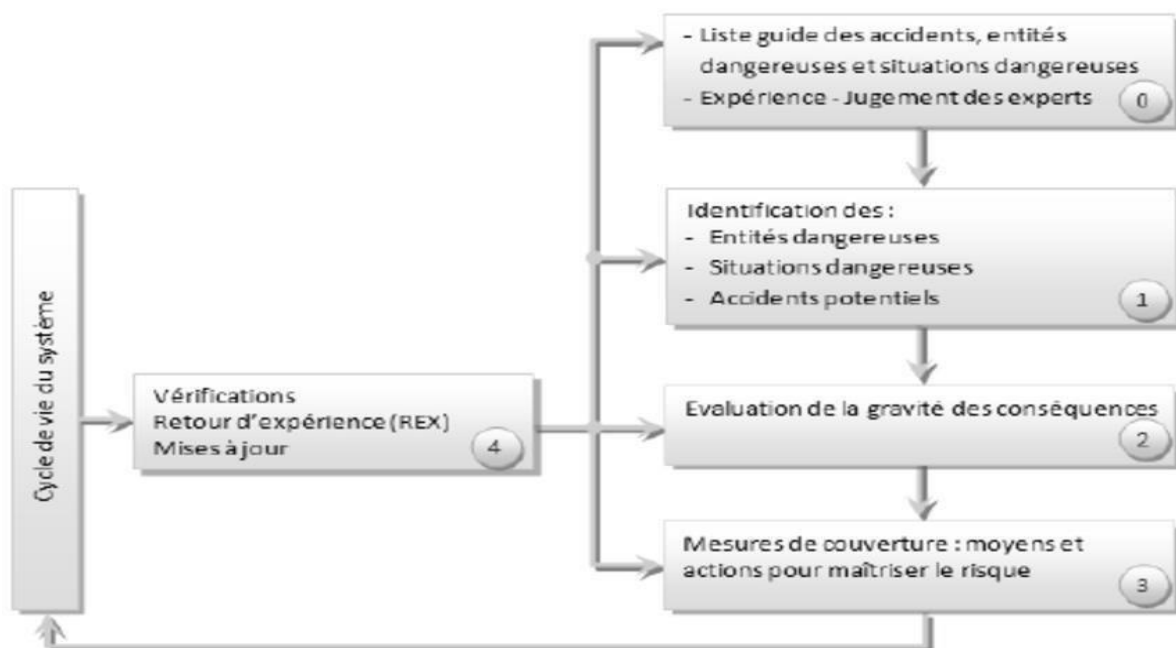


Figure II-4: Les étapes de l'APR .

II.8.3.1 Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC)

Est une méthode qui nécessite la connaissance de tous les modes de défaillance du système complexe. En effet, l'efficacité de l'AMDEC repose sur la représentativité de ces modes de défaillance et l'exhaustivité de cette liste.

L'AMDEC est une méthode qui permet :

- d'évaluer les effets de chaque mode de défaillance des composants d'un système sur les diverses fonctions de ce système ;

- de déterminer l'importance de chaque mode de défaillance sur le fonctionnement normal du système et d'en évaluer l'impact sur la fiabilité du système considéré ;
- de hiérarchiser les modes de défaillances connus suivant la facilité de détection et de traitement.

Il existe plusieurs types d'AMDEC : AMDEC produit, AMDEC processus, AMDEC projet, AMDEC service ou administrative, AMDEC sécurité, ...

Le principal avantage de l'AMDEC est son aptitude à détecter les défaillances des éléments conduisant à la défaillance globale du système. Elle constitue un outil précieux pour l'identification de défaillances potentielles et les moyens d'en limiter les effets ou d'en prévenir l'occurrence.

II.8.3.2 Arbre de Défaillance (AdD)

L'analyse par un Arbre de Défaillances (AdD) est une méthode qui permet, à partir d'un événement redouté, recensé à l'aide d'une APR, de déterminer les enchaînements d'évènements ou combinaisons d'évènements pouvant conduire à cet événement redouté.

Cette analyse permet de descendre de cause en cause jusqu'aux évènements de base susceptibles d'être à l'origine de l'évènement redouté.

L'analyse par un arbre des défaillances est fondée sur les principes suivants :

- Un événement est une combinaison d'évènements de base non décomposables ;
- Les évènements de base sont indépendants ;
- La probabilité d'occurrence des évènements de base peut être évaluée.

Le principal avantage de l'AdD est qu'il permet de considérer des combinaisons d'évènements pouvant conduire à l'évènement redouté et en associant des probabilités d'occurrence aux évènements de base (si les paramètres de fiabilité de chaque composant sont connus) il permet d'évaluer la probabilité d'occurrence d'évènement redouté (analyse quantitative) afin de disposer de critères pour déterminer les priorités pour la prévention d'accidents potentiels.

II.9 Prédiction de la fiabilité des systèmes électroniques

De nombreux modèles de fiabilité sont disponibles pour différents composants électroniques dans différents manuels et guides comme MIL-HDBK , PRISM ,et autres. Là existe deux méthodes d'estimation de la fiabilité des systèmes électroniques, à savoir la méthode du comptage des pièces et la méthode des contraintes partielles. Ces méthodes donnent plus ou moins les mêmes résultats ; la seule différence est qu'ils ont besoin d'informations différentes dans déterminer la fiabilité du système. Généralement quand il y a moins d'informations disponibles, la méthode du comptage des pièces est utilisée, c'est-à-dire dans la phase initiale de la conception.

Une modélisation basée sur ces deux méthodes est disponible dans MIL-HDBK 217F . La méthode de contrainte partielle est utilisée à un stade ultérieur de la conception.

II.9.1 Méthode de comptage de pièces

Comme mentionné précédemment, cette méthode nécessite moins d'informations et est donc utilisée dans la phase initiale de la conception. Cette méthode est aussi simple que son nom l'indique ; il commence avec le décompte des pièces qui vont servir à la conception. Puis basé sur la base des manuels ci-dessus, un taux de défaillance générique est déterminé pour le composant. Ensuite, un facteur de qualité est multiplié par le taux d'échec correspondant, ce qui modifie pour donner le taux d'échec en conséquence. Le facteur de qualité est une estimation de la qualité du matériau composant et la norme de test contre l'armée standard. Comme il peut y avoir un certain nombre de composants similaires utilisés dans un électronique circuit, ce nombre multiplie ce taux d'échec modifié Enfin, en additionnant le taux de toutes les défaillances, on obtient le taux de défaillance réel du système. Outre la qualité facteur pour des systèmes spécifiques comme les systèmes microélectroniques, un autre facteur appelé le facteur d'apprentissage est également utilisé pour la modification ultérieure du taux d'échec. Le facteur d'apprentissage représente le nombre d'années pendant lesquelles un composant a été en production. Mathématiquement, le taux d'échec total pour un système basé sur le nombre de pièces méthode peut être exprimée comme (comme indiqué dans MIL-HDBK-217F).

$$\lambda E = \sum_{i=1}^n N_i (\lambda_i g_i \pi_i Q_i)$$

λ_E = taux de défaillance total de l'équipement par 10^6 heures ;

λ_i = taux de défaillance générique pour la i ème pièce générique ;

$\pi_i Q_i$ = facteur de qualité de la pièce générique ;

N_i = quantité de la pièce générique ;

n = nombre de catégories de pièces génériques différentes dans l'équipement.

II.9.2 Méthode de contrainte partielle

A un stade ultérieur de la conception, lorsque le concepteur dispose de la conception proprement dite, cette méthode est utilisée pour l'estimation de la fiabilité du système. Cette méthode nécessite plus d'informations telles que les listes de pièces détaillées et les schémas de circuit. Ceux-ci sont nécessaires parce que l'analyse des contraintes tient compte des caractéristiques électriques et thermiques contrainte qui sera subie par chaque composant. Les modèles mathématiques pour la méthode des contraintes partielles sont disponibles dans la norme MIL-HDBK-217 pour chaque composant type, c'est-à-dire microélectronique, résistances, condensateurs et autres dispositifs électromécaniques. La première approche de la méthode d'analyse des contraintes consiste à déterminer la rupture de la base taux pour les composants. Le taux d'échec de base est alors modifié par les différents facteurs, qui sont la mesure des conditions environnementales et contraintes sous lesquelles le système doit fonctionner.

Pour les résistances le modèle donné dans est le suivant : $\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_P \pi_S \pi_Q \pi_E \times 10^6$ pannes/heure,

λ_p = taux de défaillance des pièces ; λ_b = taux d'échec de base

;

π_T = facteur de température ; π_P = facteur de puissance, π_S = facteur de contrainte de puissance ; π_Q = facteur de qualité ; π_E = facteur d'environnement.

Ce manuel fournit également les valeurs par défaut des taux d'échec de base pour presque tous types de résistances

pour les autres facteurs, des tableaux sont donnés

peuvent être utilisés pour déterminer la valeur en fonction de la condition donnée ; expressions pour calculer les facteurs sont également données.

Facteur de puissance :

$$\pi P = (p.d)^{0.39}$$

Où p.d = puissance dissipée.

Facteur de contrainte de puissance : il a deux expressions pour différents types de résistances, $\pi_S = 0.71 e^{1.1(S)}$ pour les résistances à couche fixe et les résistances variables,

$$0.54 e^{2.04(S)}$$
 pour les résistances bobinées fixes.

S : est la contrainte de puissance sous laquelle le composant fonctionne et i est définie comme le rapport de la puissance réelle à la puissance nominale.

Facteur de température : $\pi_T = 1$

À 25°C, c'est-à-dire à température ambiante.

II.10 Solutions pour une Fiabilité Accrue

Les solutions visant à améliorer la fiabilité électronique englobent des stratégies de conception robuste, la mise en œuvre de normes de fabrication rigoureuses et l'intégration de mécanismes d'auto-diagnostic. Ces approches holistiques favorisent une réduction des risques de défaillance et une meilleure réactivité face aux problèmes potentiels.

En somme, ce mémoire aspire à fournir un aperçu approfondi de la fiabilité électronique, mettant en lumière son importance cruciale dans notre société moderne. En comprenant les défis et les opportunités liés à la fiabilité électronique, nous sommes mieux préparés à relever les défis technologiques et à garantir des systèmes électroniques qui répondent aux exigences de fiabilité et de durabilité de notre époque

II.11 Conclusion

Ce chapitre est structuré de manière à explorer en profondeur chaque aspect de la fiabilité électronique. Nous commencerons par une analyse détaillée des enjeux majeurs auxquels sont confrontés les systèmes électroniques. Ensuite, nous examinerons les méthodologies et les outils utilisés pour évaluer la fiabilité, en mettant en évidence leurs avantages et leurs limites. Nous poursuivrons en explorant les solutions pratiques qui peuvent être mises en œuvre pour accroître la fiabilité électronique. Enfin, des études de cas concrètes illustreront comment ces concepts sont appliqués dans des situations réelles.

Fiabilité mécanique

II.1 Fiabilité mécanique

La fiabilité mécanique se réfère à la capacité d'un système mécanique ou d'un composant de fonctionner de manière cohérente et prévisible, sans défaillance ou panne inattendue, sur une période donnée dans des conditions spécifiques. Cela implique que le système ou le composant maintienne ses performances et ses caractéristiques souhaitées tout au long de sa durée de vie prévue.

La fiabilité mécanique est un concept crucial dans de nombreux domaines, notamment l'ingénierie, l'industrie manufacturière, l'aérospatiale, l'automobile, l'énergie, et bien d'autres. Elle englobe des aspects tels que la conception robuste, la sélection appropriée des matériaux, la fabrication précise, les tests rigoureux, la maintenance préventive et la gestion des risques.

Les ingénieurs et les concepteurs cherchent à maximiser la fiabilité mécanique en prenant en compte divers facteurs tels que la résistance des matériaux, la durabilité, la tolérance aux contraintes, la régularité de l'entretien et la surveillance continue. Des méthodes telles que l'analyse de défaillance, les simulations numériques, les tests de vieillissement accéléré et l'expérience opérationnelle sont utilisées pour évaluer et améliorer la fiabilité mécanique d'un système ou d'un produit.

En résumé, la fiabilité mécanique est essentielle pour assurer le bon fonctionnement, la sécurité et la durabilité des systèmes mécaniques dans diverses applications, contribuant ainsi à la satisfaction des utilisateurs et à la réduction des coûts liés aux pannes et aux réparations.

II.2 Méthodes d'évaluation de la fiabilité mécanique

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la fiabilité mécanique d'un système, d'un composant ou d'un produit. Ces méthodes peuvent être utilisées pour prédire la durée de vie, détecter les points faibles potentiels, optimiser la conception et les performances, et prendre des décisions éclairées en matière de maintenance et de gestion des risques. Voici quelques-unes des méthodes couramment utilisées pour évaluer la fiabilité mécanique :

II.2.1 Analyse de défaillance et mode de défaillance et de leurs effets (AMDEC) :

L'AMDEC est une méthode structurée pour identifier, évaluer et atténuer les risques de défaillance dans un système ou un processus. Elle consiste à évaluer les modes de défaillance

possibles, leurs effets potentiels et les mesures de prévention ou de correction qui peuvent être prises.

Voici les étapes typiques de l'AMDEC :

- **Sélectionner le sujet de l'AMDEC** : Déterminez le système, le composant ou le processus qui fera l'objet de l'analyse.
- **Constituer l'équipe AMDEC** : Rassemblez une équipe multidisciplinaire comprenant des experts du domaine concerné, de la conception, de la production, de la maintenance, etc.
- **Identifier les modes de défaillances** : Identifiez tous les modes de défaillances possibles du sujet de l'AMDEC. Cela peut inclure des pannes mécaniques, électriques, logicielles, etc.
- **Évaluer les effets des défaillances** : Pour chaque mode de défaillance identifié, causez les conséquences possibles en termes de sécurité, de performances, de coûts, etc.

II.2.1.1 Types d'AMDEC

Il existe cinq principaux types d'AMDEC

- L'AMDEC fonctionnelle, permet, à partir de l'analyse fonctionnelle (conception), de déterminer les modes de défaillances ou causes amenant à un événement redouté ;
- L'AMDEC produit, permet de vérifier la viabilité d'un produit développé par rapport aux exigences du client ou de l'application ;
- L'AMDEC processus, permet d'identifier les risques potentiels liés à un procédé de fabrication conduisant à des produits non conformes ou des pertes de cadence ;
- L'AMDEC moyen de production, permet d'anticiper les risques liés au non-fonctionnement ou au fonctionnement anormal d'un équipement, d'une machine ;
- L'AMDEC flux, permet d'anticiper les risques liés aux ruptures de flux matière ou d'informations, les délais de réaction ou de correction, les coûts inhérents au retour à la normale.

Chacun de ces types d'AMDEC donne en sortie un document de travail incontournable pour la suite du développement, par exemple :

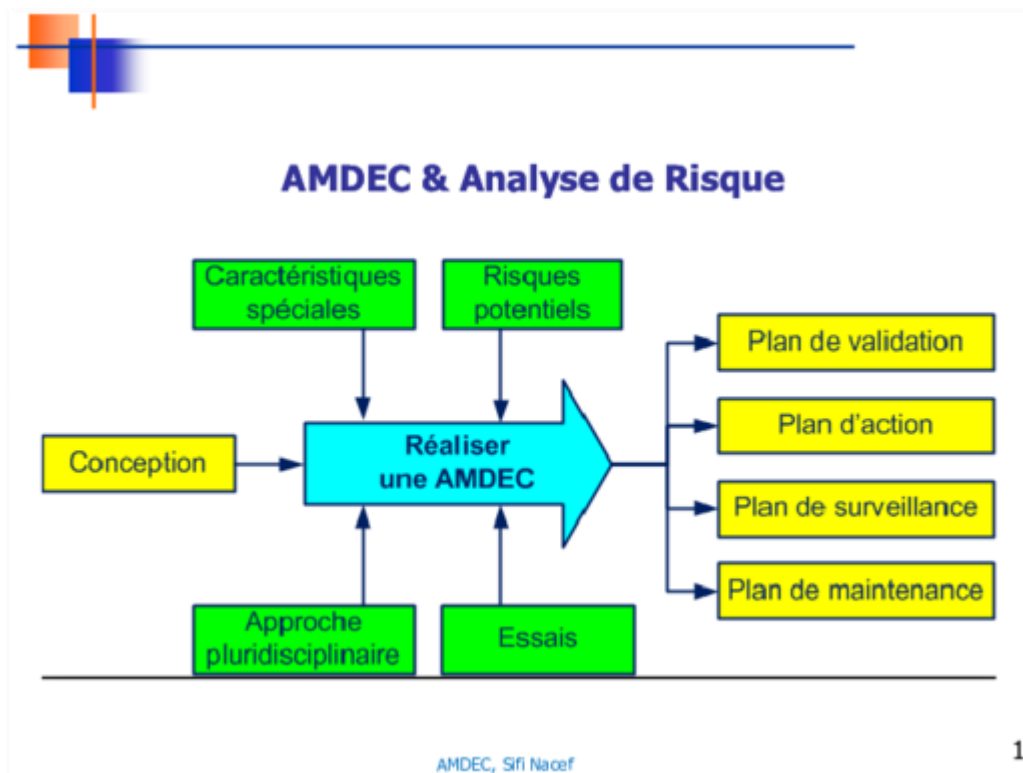
- Pour l'AMDEC produit, un plan de fiabilisation ;

- Pour l'AMDEC processus, un plan de surveillance, contrôle qualité ;
- Pour l'AMDEC moyen, une gamme de maintenance préventive ;
- Pour l'AMDEC flux, le plan de sécurisation ainsi que les stocks et délais de sécurité.

✓ **Avantages de l'AMDEC**

- Identification précoce des problèmes potentiels et des risques de défaillance.
- Prévention des défaillances avant qu'elles ne surviennent, ce qui peut réduire les coûts et améliorer la sécurité.
- Amélioration de la compréhension des processus, des produits ou des systèmes.
- Prise de décisions éclairées en matière de conception, de fabrication et de gestion des risques.
- Amélioration de la communication entre les différentes équipes et parties prenantes.

L'AMDEC est une méthode largement utilisée et éprouvée pour améliorer la fiabilité, la qualité et la sécurité des produits et des processus. Elle nécessite une approche collaborative et multidisciplinaire pour obtenir les meilleurs résultats.



II.2.2 Analyse des arbres de défaillance (FTA)

Cette méthode utilise des diagrammes en arbre pour modéliser les causes et les conséquences des défaillances d'un système. Elle permet d'identifier les séquences d'événements qui pourraient mener à une défaillance et d'évaluer la probabilité globale de défaillance du système.

Les principaux éléments de l'Analyse des Arbres de Défaillance :

- **Événement Cible** : Il s'agit de la défaillance ou de l'événement indésirable que vous souhaitez analyser en profondeur. C'est le point de départ de l'analyse.
- **Événements de Base** : Ce sont les événements élémentaires qui contribuent directement à l'événement cible. Ils peuvent être des défaillances de composants, des erreurs humaines, des conditions environnementales, etc.
- **Portes Logiques** : Les portes logiques, telles que ET (ET) et OU (OR), sont utilisées pour modéliser les relations entre les événements de base et les événements supérieurs dans l'arbre de défaillance. Les portes logiques décrivent comment plusieurs événements élémentaires peuvent conduire à un événement de niveau supérieur.
- **Analyse des Scénarios** : En utilisant des portes logiques, l'analyse des arbres de défaillance permet de décrire différentes séquences d'événements qui pourraient conduire à l'événement cible. Cela peut inclure des scénarios de défaillance uniques ou multiples.
- **Probabilités** : Pour chaque événement de base, vous pouvez attribuer une probabilité de défaillance ou de réalisation. En utilisant ces probabilités, vous pouvez calculer la probabilité globale de réalisation de l'événement cible.

L'Analyse des Arbres de Défaillance est souvent utilisée dans les industries à haute fiabilité, telles que l'aérospatiale, le nucléaire, les transports en commun, où les conséquences des défaillances peuvent être graves. Elle permet de visualiser et de comprendre les chaînes de défaillances potentielles, d'identifier les points faibles du système et de prendre des mesures pour renforcer la fiabilité et la sécurité.

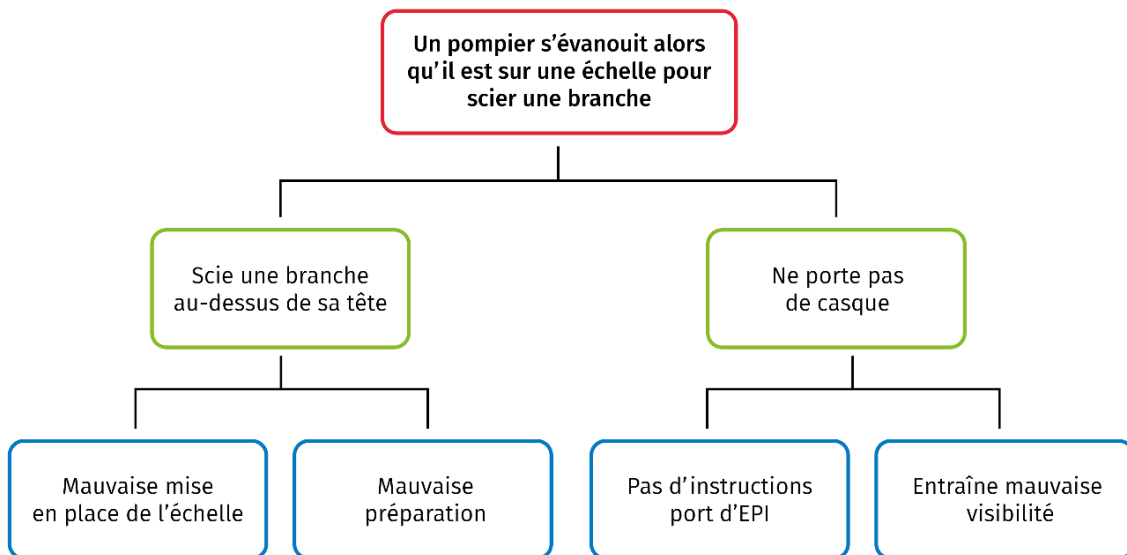
L'avantage de l'Analyse des Arbres de Défaillance réside dans sa capacité à fournir une représentation visuelle claire des causes potentielles de défaillances et à faciliter

l'identification des mesures d'atténuation et de prévention. Cependant, elle peut devenir complexe pour des systèmes très interconnectés, et elle dépend fortement de la qualité des données et des probabilités utilisées dans l'analyse.

Exemple arbre de défaillances :

Le schéma montre à quoi ressemble un arbre de défaillances. L'incident indésirable est placé à l'extrême droite dans une case. Les faits sont ensuite classés dans des cases de droite à gauche et reliés ensemble leur relation.

Arbre de défaillances : exemple



II.2.3 Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (FMMEA)

Cette méthode est une extension de l'AMDEC, L'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (FMMEA - Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis) est une méthode d'analyse qui vise à évaluer les modes de défaillance potentiels d'un système, d'un composant ou d'un processus, à identifier les conséquences de ces défaillances et à évaluer leur importance en termes de criticité.

La FMMEA est une évolution de l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) qui intègre la dimension de la criticité. Voici comment fonctionne la méthode FMMEA :

- **Identification des modes de défaillance** : Tout comme dans l'AMDEC, la première étape consiste à identifier les modes de défaillance possibles du système, du composant ou du processus.
- **Évaluation des effets des défaillances** : Pour chaque mode de défaillance identifié, la FMMEA évalue les effets potentiels de ces défaillances sur les performances, la sécurité, la qualité, la fiabilité, etc.
- **Attribution de la criticité** : La nouveauté de la FMMEA réside dans l'attribution d'une cote de criticité à chaque mode de défaillance. Cette cote prend en compte des facteurs tels que la gravité des effets, la probabilité d'occurrence et la probabilité de détection.
- **Hierarchisation et priorisation** : En combinant les cotes de criticité, la FMMEA permet de hiérarchiser les modes de défaillance en fonction de leur importance. Les modes de défaillance à haut risque sont ainsi identifiés et peuvent être traités en priorité.
- **Développement de mesures d'atténuation** : Une fois les modes de défaillance prioritaires identifiés, des mesures d'atténuation ou des actions correctives sont développées pour réduire les risques et améliorer la fiabilité.
- **Mise en œuvre et suivi** : Les mesures d'atténuation sont mises en œuvre, et le suivi est effectué pour s'assurer de leur efficacité dans la réduction des risques de défaillance.

La FMMEA est particulièrement utile dans les domaines où la sécurité, la qualité et la fiabilité sont des préoccupations majeures. Elle permet de prendre des décisions éclairées en matière de conception, de fabrication, de maintenance et de gestion des risques en identifiant les points faibles potentiels et en se concentrant sur les aspects les plus critiques du système.

II.2.4 Tests de vieillissement accéléré

Ces tests exposent le système ou le composant à des conditions de stress plus élevées que celles rencontrées dans des conditions normales d'utilisation, afin de prédire sa durée de vie en un temps plus court. Les données obtenues à partir de ces tests peuvent être extrapolées pour estimer la fiabilité à long terme.

II.2.5 Analyse de contraintes

Cette méthode implique l'évaluation des contraintes et des charges auxquelles un composant est soumis pendant son fonctionnement normal. Elle permet d'identifier les zones de stress élevé qui pourraient entraîner des défaillances.

II.2.6 Méthodes de Simulation et de Modélisation

- **Simulation de Monte Carlo** : Cette méthode repose sur la génération de nombreuses séquences aléatoires pour modéliser les incertitudes et les variations dans un système. Elle permet d'estimer la probabilité de défaillance en prenant en compte les différentes sources d'incertitude, telles que les variations de matériaux, les conditions d'utilisation et les facteurs environnementaux.
- **Modélisation de la Rupture** : Cette approche utilise des modèles mathématiques et informatiques pour prédire la rupture et la défaillance des matériaux en fonction des contraintes, des charges et des conditions environnementales. Elle peut impliquer l'utilisation d'équations de fatigue, de critères de rupture et de données expérimentales sur les matériaux.
- **Analyse de Fiabilité Basée sur la Simulation** : Cette méthode consiste à simuler le comportement d'un système mécanique dans diverses conditions et à identifier les combinaisons de facteurs qui pourraient conduire à une défaillance. Elle peut également inclure des simulations de contraintes, de températures et d'autres variables pour évaluer les performances à long terme.
- **Modélisation des Modes de Défaillance et de leurs Effets (MDFE)** : Cette approche consiste à créer des modèles qui décrivent comment différents modes de défaillance pourraient affecter le système dans son ensemble. Elle permet de quantifier les conséquences potentielles de chaque mode de défaillance et d'identifier les domaines critiques.

II.2.7 Données de fiabilité historiques

L'analyse des données de fiabilité recueillies au fil du temps peut fournir des informations précieuses sur les taux de défaillance, les modes de défaillance les plus courants et les tendances de fiabilité.

II.2.8 Tests de durée de vie

Les tests sur le terrain ou en laboratoire peuvent être utilisés pour évaluer la durée de vie réelle d'un produit ou d'un composant en observant combien de temps il peut fonctionner avant de présenter des signes de défaillance.

II.3 Application de la démarche de fiabilité mécanique

Fiabilité mécanique à un système requiert au préalable la représentation de ce dernier à l'aide d'un modèle ou un processus (analytique ou numérique), traduisant son état en fonction des sollicitations auxquelles il est soumis. Ainsi, pour le scénario de défaillance considéré, une fonction comportant en entrée différents paramètres du modèle physique est définie, généralement sur la base des connaissances relatives aux mécanismes conduisant au mode de défaillance en question. Les variables physiques du système étudié (aussi appelées variables de base ou de conception), sont par exemple les variables relatives au chargement, à la géométrie, aux matériaux, aux défauts et à tous autres paramètres pouvant avoir une action sur le mode de défaillance.

Le modèle est exprimé sous la forme d'une fonction des variables de conception. Cette fonction est par convention formulée de telle sorte que pour les différentes réalisations des variables considérées, ses réalisations positives ou négatives traduisent respectivement la survie ou la défaillance du système. La fonction ainsi définie est appelée fonction d'état ou de performance. Elle est notée G (pour "Grenze", frontière en Allemand), en raison du fait qu'elle partitionne l'espace des variables de conception en domaines de sûreté et de défaillance. Les variables de conception peuvent être réparties en deux ensembles selon leurs degrés respectifs de dispersion statistique : un ensemble de variables considérées comme aléatoires, rassemblées dans le vecteur \mathbf{X} , et celles qui sont supposées déterministes, utilisées comme paramètre de la fonction d'état.

Sous ces considérations, le calcul de la probabilité de défaillance du système étudié revient à celui de la probabilité de l'évènement $G(\mathbf{X}) \leq 0$:

$$P_f = \text{Prob}(G(\mathbf{X}) \leq 0)$$

II.4 Objectifs et intérêts de la fiabilité en mécanique

L'analyse de la fiabilité constitue une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement. A l'origine, la fiabilité concernait les systèmes à haute technologie (centrales nucléaires, aérospatial). Aujourd'hui, la fiabilité est devenue un paramètre clé de la qualité et

d'aide à la décision, dans l'étude de la plupart des composants, produits et processus "grand public" : Transport, énergie, bâtiments, composants électroniques, composants mécaniques.... De nombreux industriels travaillent à l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité de leurs produits au cours de leur cycle de développement, de la conception à la mise en service (conception, fabrication et exploitation) afin de développer leurs connaissances sur le rapport Coût/Fiabilité et maîtriser les sources de défaillance.

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

II.5 Spécificité de la fiabilité en mécanique

II.5.1 Fiabilité dans le cycle de vie d'un produit

II.5.1.1 Courbe en baignoire

La courbe en baignoire représente l'évolution du taux de défaillance en fonction du temps le long du cycle de vie du matériel. Elle permet de diviser le cycle de vie en trois phases principales : la phase de jeunesse, la phase de vie utile et la phase de vieillissement.

Le positionnement dans l'une des trois différentes phases de la courbe en baignoire est lié à la valeur du paramètre de forme de la loi de Weibull.

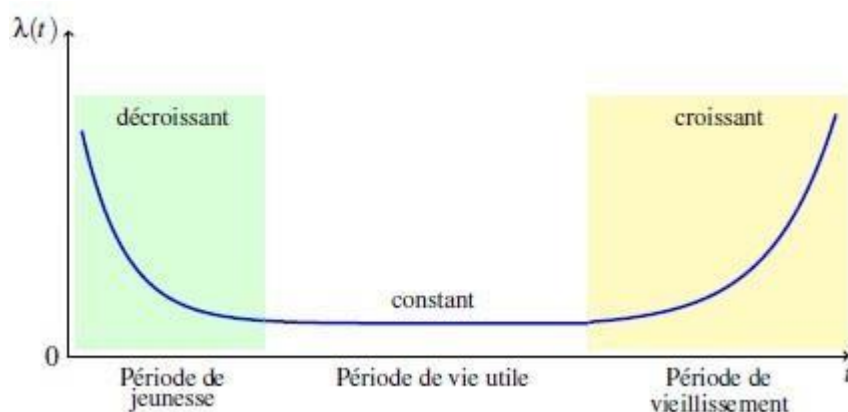


Figure II-1: Courbe en baignoire .

L'allure de la courbe en baignoire peut changer selon le type de produit (électronique, informatique ou mécanique). Le cycle de vie des composants électroniques est représenté de la même manière que la courbe en baignoire présentée sur la (figure II.1). Dans ce cas, la phase de jeunesse où l'on observe une décroissance rapide du taux de défaillance représente la période de déverminage ou d'élimination des défauts de conception ou de fabrication du produit. Ensuite dans la deuxième phase, on observe un taux de défaillance constant qui signifie que la fréquence des défaillances (qui ont un caractère aléatoire) est indépendante de l'âge du produit. C'est généralement dans cette phase que les études de fiabilité prévisionnelle sont réalisées (Estimation du paramètre λ du modèle exponentiel de fiabilité). Pour finir, dans la phase de vieillissement, le taux de défaillance croît au fil du temps. L'on est alors en présence des phénomènes d'usure, de corrosion, fatigue etc...

II.5.1.2 Cycle de vie d'un système mécanique

La particularité du cycle de vie d'un système mécanique (figure II.2) est l'inexistence de la phase de durée de vie utile. Il comporte deux phases :

— La première et la plus courte, définit la période de mortalité infantile. Elle est caractérisée par une décroissance du taux de défaillance due généralement aux améliorations des propriétés internes et surfaciques (traitement thermique, rodage etc...). Les lois de Probabilité utilisées pour cette phase sont la loi de Weibull ($\beta < 1$) et la loi Log Normale ($\sigma > 1$).

— La deuxième phase et la plus longue, est la période de vieillissement du système, modélisée par un taux de défaillance croissant au cours du temps caractéristique des phénomènes de corrosion, d'usure, de déformation, de fatigue etc ... Les lois de probabilité utilisées pour cette phase sont la loi de Weibull ($\beta > 1$) et la loi Log Normale ($\sigma < 1$).

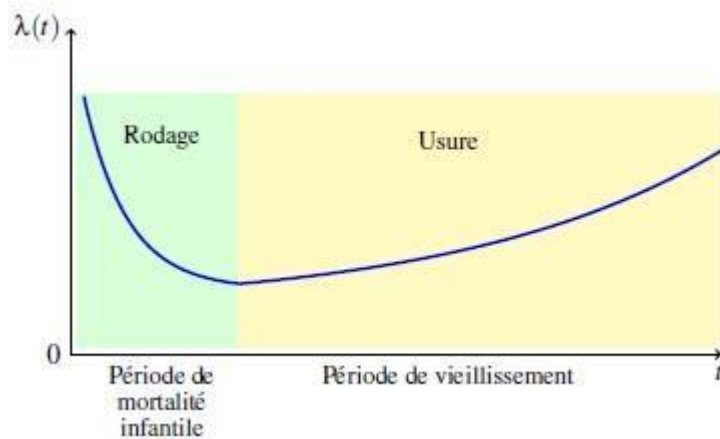


Figure II-2: Cycle de vie d'un système mécanique .

Contrairement aux composants électroniques, les calculs de la fiabilité pour des composants mécaniques se font essentiellement dans la période de vieillissement, en utilisant des lois de probabilité dont le taux de défaillance est fonction du temps telles que la loi Log Normale, Weibull, etc....

II.6 Fiabilité dans le cycle de développement d'un produit :

En fonction du niveau où l'on se situe dans le cycle de développement du produit, on distingue trois catégories d'étude de fiabilité :

- La fiabilité prévisionnelle (dès le début du projet) ;
- La fiabilité expérimentale (développement, maturité, production) ;
- La fiabilité opérationnelle (en exploitation, données du retour d'expériences).

La figure II-3, permet de situer dans le cycle de développement du produit, chaque type d'étude de fiabilité ainsi que les méthodes et outils associés :

Comme le montre la figure II-3, la fiabilité prévisionnelle, fait appel d'une part à des méthodes dites qualitatives comme l'Analyse des Risques Préliminaires (APR), l'Analyse des Modes de

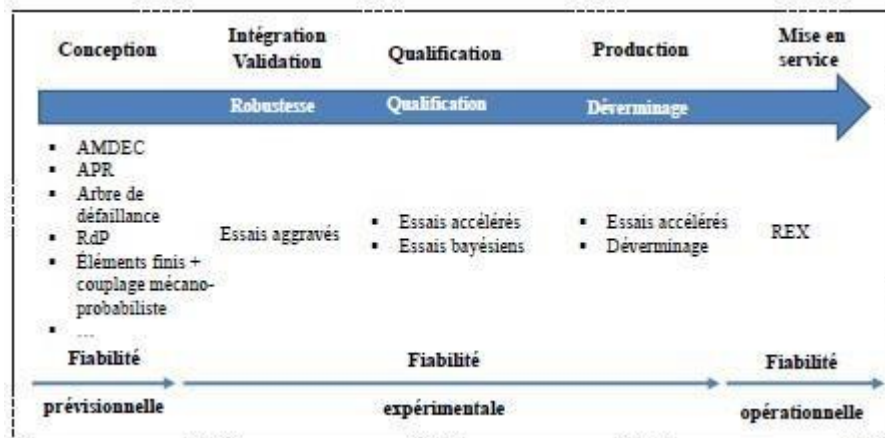


Figure II-3: Cycle de fiabilisation d'un produit .

Défaillances, de leurs Effet et Criticité (AMDEC) etc..., et d'autre part à des méthodes quantitatives comme les Arbres de Défaillances, les diagrammes de fiabilité etc... Dans le cas de systèmes complexes, des méthodes de modélisation comme les réseaux de pétri (RdP) ou les chaînes de Markov sont utilisées. Il faut noter qu'en mécanique, l'estimation de fiabilité prévisionnelle en phase de conception est généralement obtenue par des méthodes de couplage mécano-probabiliste faisant appels aux calculs par éléments finis.

L'étude de la fiabilité expérimentale donne lieu à la mise en oeuvre de trois types d'essais de fiabilité que nous détaillons dans la suite. Ce sont les essais de robustesse ou essais aggravés (Sur les premiers prototypes), les essais d'estimation de la fiabilité (lorsque le produit est mature) et les essais de déverminage (lors de la production).

La fiabilité opérationnelle quant à elle, s'appuie sur les données obtenues du retour d'expérience. Ce dernier est généralement basé sur la collecte et la gestion de faits techniques, observés pendant toute la durée de vie du système, de sa mise en service jusqu'à sa désintégration.

II.7 Particularité de la fiabilité mécanique

Pour mener à bien une étude de fiabilité, il est important d'identifier en fonction du profil de mission du produit, les différents modes de défaillance associés. En mécanique, les défaillances des composants ont des origines variées, dont les plus fréquentes sont détaillées ci-après.

II.8 Complexité des phénomènes physiques de dégradation

Les composants mécaniques sont caractérisés par de multiples mécanismes de dégradation

Souvent complexes, d'origines variées (fissuration, fluage, usure, fissuration par fatigue, etc.). Ces modes de dégradation font intervenir plusieurs paramètres :

- Caractéristiques matériaux (limite élastique, limite à la rupture, limite d'endurance, limite de fatigue, ténacité, dureté,...),
- Caractéristiques dimensionnelles (géométrie,...),
- Sollicitations extérieures (température, chargement, pression, ...).
- Forte interaction entre le composant et son environnement, etc.

Les effets dus au fluage, à l'usure et à la corrosion peuvent être maîtrisés par des dimensionnements de pièces correctes et des traitements de surfaces appropriés. Les problèmes majeurs de la fiabilité en mécanique proviennent essentiellement des contraintes trop élevées et des phénomènes de fatigue. Par conséquent l'analyse de la fiabilité des structures et des systèmes mécaniques devient de plus en plus une procédure complexe.

II.8.1 Fatigue des matériaux

La fatigue des matériaux consiste en la dégradation ou la modification des propriétés mécaniques des matériaux, suite à l'application répétée d'un chargement cyclique ou non, conduisant à une rupture. Le comportement du système est caractérisé par une courbe dite courbe de Wöhler.

II.8.2 Rupture par fissuration

Le phénomène de rupture par fissuration, comme son nom l'indique, conduit à la rupture du matériau mécanique à cause de l'évolution d'une fissure existante, par exemple la propagation d'un défaut de fabrication ou la présence de défauts internes. Cette évolution est provoquée par une application répétée d'un chargement cyclique. L'étude du comportement d'une fissure sous contrainte est la base de la mécanique de la rupture.

II.8.3 Fluage

Le fluage est un mécanisme de dégradation lié au chargement et à la température conduisant à une déformation du matériau (allongement ou élongation). Ce mécanisme intervient dès que la température du matériau dépasse 0.3 à 0.4 fois la température absolue de fusion (environ 400°C pour les aciers)

II.8.4 L'usure et l'érosion

Ces deux modes sont liés au frottement entre deux pièces mécaniques provoquant l'augmentation du jeu entre elles (élimination de matière).

Il est important de noter que de nombreux systèmes peuvent subir une combinaison de ces modes de défaillances, ce qui peut rendre la gestion de la fiabilité mécanique complexe. Les ingénieurs et les techniciens doivent donc adopter une approche holistique pour identifier et prévenir ces modes de défaillances afin d'assurer le bon fonctionnement et la durabilité des systèmes mécaniques.

II.9 Données de fiabilité pour des composants mécaniques

Les principales bases de données de fiabilité en mécanique sont présentées dans le tableau suivant (tableau 2) :

Source	Titre	Éditeur	Dernière version
AVCO	² Failure Rates ² .	D.R.Earles&M.F.Eddins AVCO Corporation, USA.	Avril 1962.
NPRD	Nonelectronic Parts Reliability Data.	Reliability Analysis Center, RAC, New York, USA.	NPRD 97, 1997.
NSWC	Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment.	Carderock Division, Naval Surface Warfare Center, United States Navy.	NSWC-98/LE1, 1998.

EIREDA	European Reliability Industry Data Handbook	European Commission and Electricité de France CRETE UNIVERSITY PRESS	1998
FARADA	Failure Rate Data	GIDEP-Government Industry Data Exchange Program (USA)	Mil-STD-1556 B, 24 février 1986

Tableau 2.2. Recueils de données de fiabilité en mécanique

✓ **AVCO**

L'AVCO est un manuel américain très ancien regroupant des tables de données de fiabilité pour des composants mécaniques : des durées de vie moyennes, des taux de défaillance génériques sous forme de nombre de défaillances par million d'heures et par million de cycles en fonction des conditions d'environnement (généralement, on trouve des intervalles $[min, max]$ avec un certain niveau de confiance).

✓ **NPRD**

Le NPRD est un rapport du centre RAC ²Reliability Analysis Center² très utilisé pour évaluer la fiabilité des composants et dispositifs non électroniques, c'est un complément du MILHDBK-217. Il fournit des taux de défaillance moyens pour une large variété de composants non couverts par le MIL-HDBK-217 (plus de 25000 composants) : des composants mécaniques, électromécaniques ou physico-chimiques.

Les données collectées, depuis l'année 1970 jusqu'à 1994, sont représentées par des tableaux contenant : une présentation du composant, son niveau de qualité (militaire, commercial ou inconnu), des conditions d'environnement et d'utilisation du composant, des sources de données, des taux de défaillance moyen par millions d'heures ainsi que des intervalles de confiances, des nombres de pannes observées, le nombre d'heures de fonctionnement (en million), etc.

✓ **NSWC**

Le NSWC est un catalogue publié par la Marine des États-Unis ²Naval Surface Warfare Center², il fournit des modèles de taux de défaillance, supposés constant, pour des classes fondamentales de composants mécaniques tels que les ressorts, les moteurs, les freins, les embrayages, etc. Les modèles du taux de défaillance incluent des facteurs pouvant avoir un impact sur la fiabilité des composants. Ces facteurs tiennent compte des modes de défaillance et des paramètres qui les engendrent, par exemple les caractéristiques matériaux, les conditions d'environnement, les forces appliquées, etc. Ces paramètres constituent des données d'entrée pour les modèles de taux de défaillance.

Le NSWC est une norme relativement nouvelle et seule dans son genre. Néanmoins l'un de ces inconvénients est dû au fait que les modèles présentés exigent une quantité suffisante de données d'entrée, ce qui n'est pas toujours disponible.

✓ **EIREDA**

Le manuel EIREDA (European Reliability Industry Data Handbook) donne des taux de défaillance, supposés constants, pour des produits mécaniques et électroniques en fonctionnement et en sollicitation, à l'usage des centrales nucléaires.

✓ **FARADA**

Le FARADA (Failure Rate Data) fournit des données de fiabilité pour des composants de toutes natures : une estimation des taux de défaillance, nombre de pannes observées, type de pièce, mode d'utilisation, etc.

II.10 Fiabilité système- Modélisation de la fiabilité des équipements mécaniques

II.10.1 Procédure générale

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

La fiabilité d'un système mécanique, contrairement à l'électronique, repose sur la fiabilité de quelques composants élémentaires responsables de son dysfonctionnement, dits composants "responsables" ou "critiques" (parfois un seul), contribuant presque totalement à la probabilité de défaillance de l'ensemble. Voir. Les autres composants pouvant être considérés de probabilité de défaillance pratiquement nulle.

L'identification de ces composants se fait en effectuant des analyses qualitatives, telles que l'APR (Analyse Préliminaire des Risques) et l'AMDEC (Analyse de Modes de défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticité), et des analyses quantitatives telles que l'analyse par arbres de défaillance. Ensuite, nous en créerons un modèle à partir d'un diagramme de fiabilité, par exemple sous forme d'un schéma bloc. Le taux de défaillance du système sera donc calculé en fonction de l'architecture du système donnée par ce schéma.

Le plus souvent, les systèmes mécaniques sont considérés à configuration série, Du fait qu'on garde que les composants critiques. Dans ce cas et lorsque les composants du système sont supposés indépendants, les caractéristiques de fiabilité sont les suivantes :

- La fiabilité $R(t)$ d'un système mécanique non réparable est le produit des fiabilités des composants "critiques", la défaillance de l'un de ces éléments entraîne la défaillance du système :

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

- Le taux de défaillance $L(t)$ du système est approximativement égal à la somme des taux de défaillance individuels ($\lambda_i(t), i=1, \dots, n$) :

$$L(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t)$$

II.11 Fiabilité de composants mécaniques spécifiques ; Méthode R-C

De manière générale, le dimensionnement de structures se fait en considérant un mode de défaillance donné. Il est basé sur l'établissement d'une relation mécanique caractérisant son état en fonction des variables de la structure. Cette relation mécanique est composée de deux termes :

1. un premier terme noté C donnant l'état de sollicitation de la structure (efforts internes s'exerçant dans la structure) en fonction d'un mode de ruine donné (statique, fatigue, etc...),
2. et un deuxième noté R caractérisant la résistance à cette sollicitation ou contrainte exercée.

Deux démarches de dimensionnement se distinguent : l'approche déterministe et l'approche probabiliste encore appelée la méthode résistance-contrainte (R-C).

Le principe de l'approche déterministe est basé sur l'utilisation d'un coefficient de sécurité K (imposé par des normes) qui intègre toutes les incertitudes et marges de sécurité. Le coefficient de sécurité K se calcule comme suit :

$$k = \frac{R}{C}$$

Ensuite, pour valider la conception on vérifie si le coefficient K calculé reste supérieur à un coefficient de sécurité seuil préalablement fixé. Cette approche conduit généralement d'une part à un surdimensionnement de la structure (K grand pour réduire les risques), et d'autre part à une augmentation du risque de ruine ou de défaillance, lorsqu'on cherche à réduire K sans maîtriser son évaluation. Pour intégrer de manière plus adéquate les incertitudes relatives aux variables de conception, la méthode probabiliste d'évaluation de la fiabilité a été développée depuis de nombreuses années.

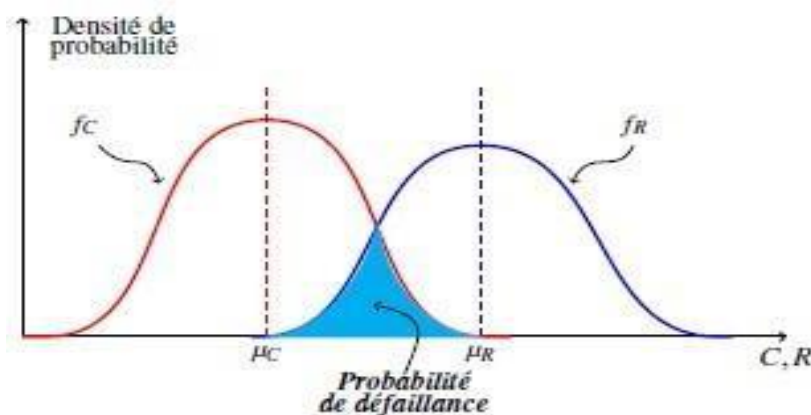


Figure II-4: Méthode contrainte résistance probabiliste : Diagramme de Warmer .

Dans une démarche probabiliste, les variables du problème mécanique à savoir R et C ne sont pas déterministes. Elles sont considérées comme des variables aléatoires avec des lois de distributions associées (figure II-4). La figure II-4 prend l'appellation de diagramme de Warmer. La probabilité de défaillance P_f est estimée à partir de ces deux variables aléatoires,

comme la probabilité que la résistance soit inférieure à la contrainte appliquée durant la durée de vie du système. D'un point de vue mathématique P_f est calculée à partir de la relation suivante :

$$P_f = \text{Prob} (R \leq C)$$

$$P_f = \iint_{\{(R,C)|r \leq c\}} f_{R,S}(r, c) dr dc$$

Où $f_{R, S}$, représente la densité de distribution conjointe des variables R et S.

Dans le cas où les deux variables sont indépendantes l'expression de P_f devient :

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{r=0}^c f_R(r) dr \right) f_C(c) dc$$

ou

$$P_f = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{r=0}^c f_C(c) dc \right) f_R(r) dr$$

Avec f_C , et f_R les densités de distribution respectives des variables R et S.

Selon les cas, l'intégrale peut s'avérer plus ou moins complexe à évaluer. Plusieurs méthodes d'évaluation existent et seront présentées dans la section suivante, où nous abordons l'estimation de fiabilité mécanique prévisionnelle dans un cadre plus globale qu'est le couplage mécano-probabiliste.

II.12 La place de la fiabilité en mécanique dans l'analyse de risque

La fiabilité en mécanique se retrouve dans toutes les phases :

- dans la phase d'établissement du contexte : la description, la géométrie, la fonction, la réglementation, le retour d'expérience historique, les exigences ;
- dans l'identification : le scénario, les modes de défaillance et les mécanismes de dégradation ;

- dans les phases d'analyse et d'évaluation : l'estimation de la probabilité d'occurrence et des conséquences ;
- dans le traitement des causes et des conséquences : les options de maîtrise des risques (barrières, plan de sécurité, programme de maintenance et du soutien, etc.) ;
- dans la phase de pilotage et de révision, par le retour d'expérience.

La fiabilité en mécanique intervient principalement dans la phase d'analyse et de traitement où s'effectuent la quantification, déterministe et probabiliste, et la hiérarchisation des risques, où on estime le risque, c'est-à-dire sa probabilité d'occurrence et sa gravité.

La figure (II.5) donne le principe général du calcul mécanique et probabiliste de la méthode contraintes-résistance, permettant l'estimation de la probabilité de défaillance. L'étape A est l'étape de modélisation du modèle mécanique. L'étape B quantifie toutes les sources d'incertitudes issues des données pour les paramètres d'entrée. L'étape C propage les incertitudes dans le modèle et calcule les résultats de sortie, en particulier la probabilité de défaillance P_f . L'étape C' permet de déterminer les variables les plus influentes, celles pour lesquelles il conviendra de faire un effort de collecte de données et de modélisation, pour une analyse plus fine de la fiabilité.

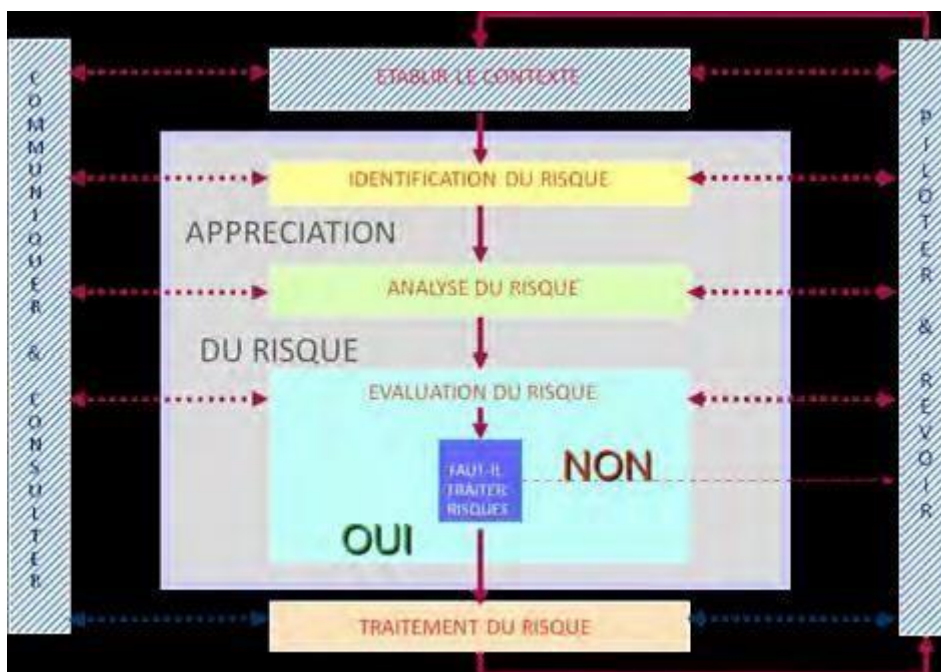


Figure II-5:Le processus d'analyse de risque tel qu'il est défini dans l'ISO 31000.

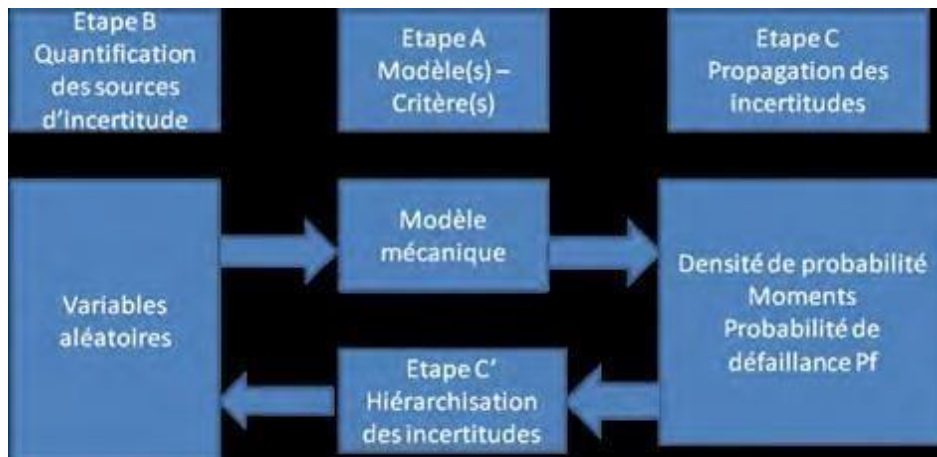


Figure II-6:Le principe du calcul mécanique et probabiliste de la méthode contraintes-résistance.

II.13 Ajustement des taux de défaillance des équipements mécaniques

Il est reconnu aujourd'hui que la fiabilité des équipements mécaniques est un facteur vital dans le développement, la production, l'opération et la maintenance des systèmes complexes. La référence la plus utilisée pour ajuster les taux de défaillance des équipements mécaniques, est le manuel des procédures de la prévision de la fiabilité pour les équipements mécaniques « The Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment (NSWC-94/L07) ». Ce manuel a été développé par la marine américaine, il fournit des modèles d'ajustements des taux de défaillance, pour différents types de dispositifs mécaniques, comprenant des ressorts, des roulements, des joints, des moteurs, des freins, et des embrayages. C'est une norme relativement nouvelle, et actuellement, la seule de son genre. Cette référence est utilisée essentiellement dans la phase de design. Elle permet à partir de ses modèles, une analyse de conception pour identifier les modes de défaillance critiques, les causes de la non fiabilité des équipements mécaniques et fournir un outil pertinent pour prévoir le comportement de l'équipement afin de choisir la logistique appropriée qui assure son bon fonctionnement lorsqu'il sera opérationnel dans un environnement réel.

Malgré la rigueur et la clarté du (NSWC-94IL07), Le niveau poussé d'information requise, limite son utilisation, vu que les détails exigés ne sont pas toujours spécifiés sur les manuels d'utilisation et sur les fiches techniques qui accompagnent souvent les équipements.

II.14 Conclusion

Dans ce chapitre on 'a traité la fiabilité mécanique, sa définition et son rôle dans des nombreux domaines.

Par la suite, nous avons montré les différentes méthodes d'évaluation et d'amélioration d'un système ou d'un produit, ainsi les modes de défaillances qui sert à mettre en place des stratégies de maintenance préventive efficaces et afin d'assurer le bon fonctionnement et la durabilité du système.

Enfin, nous avons montrés quelques bases de données de fiabilités en mécanique et ça place en analyse de risque

CHAPITRE III: description de la société et la maintenance

III.1 Présentation de la société “Briqueterie izerkhef”

Située dans la zone industrielle AISSAT IDIR Tizi-Ouzou. La SARL BTI est créée en date 19/06/2013 dans le cadre du dispositif ANDI par des jeunes promoteurs qui ont débutés dans le cadre ANSEJ et qui ont bénéficié d’une attribution du terrain en juin 2014 à la zone industrielle AISSAT IDIR Tizi-Ouzou dans le cadre de l’ex dispositif CALPIREF pour l’implantation d’un projet de production des matériaux de construction. Actuellement, cette entreprise n’est pas exploitée à sa capacité optimale, en effet son inauguration a eu lieu le 23 février 2017.

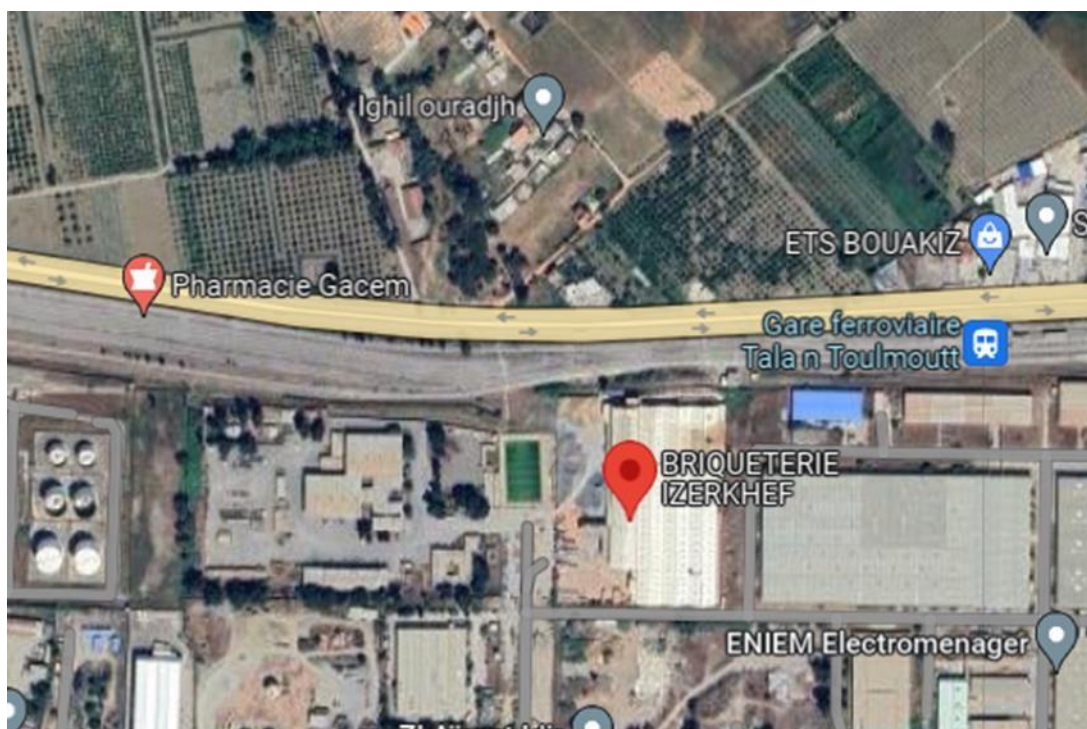


Figure III-1:localisation de la briqueterie izerkhef.

Tableau III-1:Les capacités de la Sarl BTI IZERKHEF.

Nom du gérant	Monsieur IZERKHEF DJEBAR
Date de création	Le 19/06/2013
Montant d’investissement	2 500 000 000.00
Capacité de production	420 000 tn/ans soit 1200 tn/jour.
Types de produits	Briques mono blocs
Date de lancement du projet	Le 23/09/2014
Nombres d’emplois directs	300 postes

Nombres d'emplois indirects	150 postes
-----------------------------	------------



Figure III-2:L'atelier Briqueterie izerkhef.

III.2 Chaîne de production

III.2.1 Preparation

Dans cette partie ont préparé bien la matière première, elle est constituée de l'argile et le sable. La preparation ça marché selon les trois étapes suivantes:

III.2.1.1 Broyage et tamisage (granulation)

L'argile provient des carrières. Après avoir été traité dans un broyeur, elle est stockée dans un parc de matières premières ou chambre de pourriture, où se déroulent l'homogénéisation et le mélange initial de l'argile, en fonction du type de produit fabriqué.

III.2.1.2 Malaxage et laminage

C'est l'étape d'humidification et de gâchage qui pour l'ajout d'eau à l'argile pour obtenir la plasticité suffisante à l'extrusion ou au moulage. C'est une opération clef car elle conditionne les opérations de séchage et de cuisson.

III.2.1.3 Moulage

à la sortie du malaxeur de criblage l'argile est transférée par une bande transporteuse vers la mouleuse dans laquelle tourne une vis sans fin qui pousse l'argile avec une pression déterminé vers la sortie où l'attend une filière (moule) qui donne la forme de la brique

III.2.1.4 Ligne de coupe

Doté un pré-coupeur qui coupe les boudins en un morceau pour qu'il soit sectionné en longueur de brique à dimension prédéfini par le laboratoire. Cette opération de pré-coupe et coupe est automatique et réalisé à intervalle défini selon la cadence définie.

III.2.1.5 Séchoir

Le séchoir à balancelles est constitué de deux canaux superposés dans lesquels des balancelles circulent en sens inverse du flux d'air. Ces deux canaux sont reliés à leurs extrémités.

III.2.1.6 Empilage

Après le séchage intervient un premier contrôle visuel et un tri manuel des briques non-conformes. Ensuite un empileur empile les briques sous forme de pilles sur le wagon.

III.2.1.7 Four Gaudí

Un four étanche conçu et réalisé par Equipe céramique qui, en permettant de travailler en pression, garantit une meilleure qualité, une régulation plus facile et plus de souplesse. Ce four est économique du point de vue de la consommation énergétique grâce à l'étanchéité de sa construction et à tous les circuits dont il est équipé, tant au niveau de la combustion qu'au niveau des systèmes de ventilation et de brassage

III.2.1.8 Dépilage

C'est une étape qui consiste à conditionner les briques sous forme de paquets cerclés par le ruban et entreposés dans les aires de stockage pour être chargés par la suite à l'aide des chariots élévateurs sur les camions client.

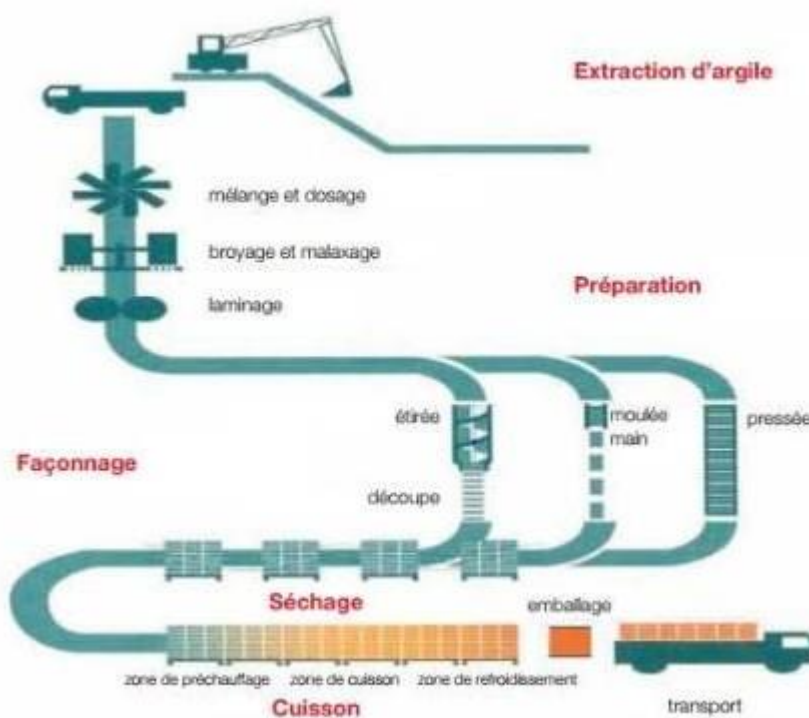


Figure III-3:Chaine de production.

Tableau III-2:historique de panne de la briqueterie izerkhef.

N	Date	Pannes	Temps de réparation (h)
1	05/01/2021	Blocage mécanisme de tapis	46h
2	27/01/2021	Arrêt définitif de coupure	112h
3	14/02/2021	Arrêt définitif dépilage	62h
4	02/03/2021	Blocage mécanisme de cerceuse	3h
5	15/03/2021	Nettoyage des cerceuse	9h
6	04/04/2021	Panne électrique du convoyeur	38h
7	28/04/2021	Panne électrique de cerceuse	11h
8	15/05/2021	Arrêt définitif de la cerceuse ligne A	19h
9	02/06/2021	Arrêt répétitif de ligne de B	6h
10	10/07/2021	Blocage mécanisme Pince de dépilage	14h
11	22/07/2021	Blocage mécanisme de système séparation A	11h
12	30/07/2021	Blocage mécanisme de système séparation B	17h

13	24/08/2021	Blocage mécanisme de pince de paquetisation	70h
14	12/09/2021	Blocage mécanisme de tapis roulant décharge (changement roulant)	10h
15	05/10/2021	Arrêt définitif du mouleuse	24h
16	18/10/2021	Changement de chemise de malaxeur	30h
17	28/10/2021	Panne mécanique chamber a vide	3h
18	09/11/2021	Arrêt répétitif du mouleuse	4h
19	18/11/2021	Arrêt de filière de moule	72h
20	28/11/2021	cercluse plain de brique cassé	48h

III.3 Maintenance

III.3.1 Introduction

La définition de la maintenance selon la norme AFNOR X60-010 est : ” Ensemble des activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administrative et de management.”

Il y a multiples techniques de la maintenance, tout est pour le but d'améliorer la disponibilité et assurer le bon fonctionnement, par l'analyse de ces comportements de ces dernies chose, qui permettent de voir leur point faible qui conduira à une solution évidente.

III.3.2 Rôles de la maintenance

Le service maintenance doit mettre en œuvre la politique de maintenance de la direction de l'entreprise pour atteindre une performance maximale du système de production. Cependant, tous les équipements n'ont pas la même importance de maintenance, il faut donc des capacités de maintenance pour établir des prévisions ciblées :

- **Les prévisions à long terme** : Elles sont liées à des investissements importants ou à des travaux de longue durée
- **Prévision à moyen terme** : La maintenance doit être effectuée avec le plus grand soin possible, y compris la planification de la charge de production. Il faut prévoir un maximum de ses interventions en fonction du plan de production.

- **Prévisions à court terme** : elles peuvent être de l'ordre d'une semaine, d'un jour ou d'heures.

III.3.3 Objectif de la maintenance

L'objectif de la maintenance est :

- Fournir des outils fiables pour la production.
- Améliorer le profit accumulé par l'équipement tout au long de son cycle de vie en :
 - 1- Réduire le coût de l'échec.
 - 2- Augmenter la durée de vie rentable de l'équipement.
 - 3- Maintenir et/ou améliorer les performances en termes de qualité/quantité.
 - 4- Réduire les risques d'accidents.
- Réduire les risques liés à la sécurité des personnes et à l'environnement.

III.3.4 Classification par niveaux de maintenance

Utilisation pratique est recommandée entre les partenaires selon le type de Les 5 niveaux normalisés sont donnés à titre indicatif pour servir de guide niveaux de maintenance réalisés à l'intérieur de l'entreprise et ceux confiés à des maintenir. Une politique de maintenance bien définie, doit clairement identifier entreprises de sous - traitance ou à des constructeurs. Ils permettent, en outre d'identifier le niveau de diagnostic auquel on s'intéresse : systèmes, sous - systèmes matériels, composants élémentaires.

Niveau 1 : “Réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement, ou échanges d'éléments consommables accessibles en toute sécurité, tels que voyants ou certains fusibles.”

Niveau 2 : “ Dépannages par échange standard des éléments prévus à cet effet et opérations mineures de maintenance préventive, telles que graissage ou contrôle de bon fonctionnement. ”.

Niveau 3 : “Identification et diagnostic des pannes, réparations par échange de composants ou d'éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineures, et toutes opérations courantes de maintenance préventive telles que réglage général ou réalignement des appareils de mesure.”.

Niveau 4 : “ Tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive l'exception de la rénovation et de la reconstruction. Ce niveau comprend aussi le réglage des

appareils de mesure utilisés pour la maintenance, et éventuellement la vérification des étalons de travail par les organismes spécialisés.”

Niveau 5 : “Rénovation, reconstruction ou exécution des réparations importantes confiées à un atelier central ou à une unité extérieure.”

III.3.5 Type de maintenance

Il y a deux types de maintenance :

III.3.5.1 Maintenance préventive

Selon AFNOR X60-010 : ” Maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d’un bien ou d’un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échancier établi à partir d’un nombre prédéterminé, et/ou des critères prédéterminés significatifs de l’état de dégradation du bien ou du service“

Les activités correspondantes sont déclenchées selon :

1. Un échancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unité d'usage.
2. Et/ou des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service.

Il y a trois types de maintenance préventive :

III.3.5.2 Maintenance systématique

Selon AFNOR X60-010 : “Ce type de maintenance comprend l’ensemble des actions destinées à restaurer, en totalité ou partiellement, la marge de résistance des matériels non défaillants, lorsque ces tâches sont décidées en fonction du temps ou de la production, sans considération de l’état de matériels à cet instant.

Ce type de maintenance concerne des composants dont la durée de vie moyenne est précisément connue sous des réglementations impératives ou des contraintes légales.

III.3.5.2.1 Maintenance conditionnelle

“Ce type de maintenance comprend toutes les tâches de restauration de matériels ou de composants non défaillants, entreprises en application d'une évaluation d'état et de la comparaison avec un critère d'acceptation préétabli (défaillance potentielle)”.

Il apparaît immédiatement que ce type de maintenance préventive nécessite une tâche supplémentaire pour évaluer le degré de dégradation. Ces tâches sont considérées comme

faisant partie de la maintenance basée sur l'état car elles sont au cœur du processus de prise de décision, bien que la plupart d'entre elles soient effectuées périodiquement.

III.3.5.2.2 Maintenance prévisionnelle

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

III.3.5.3 Maintenance corrective

« Ensemble des activités réalisées après la défaillance du bien, ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, qu'moins provisoirement : ces activités comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, le contrôle du bon fonctionnement. »

La maintenance corrective comprend notamment :

- La localisation du défaut et son diagnostic.
- Réparations avec ou sans modification.
- Vérifier le fonctionnement normal.

Il y a deux types de maintenance corrective :

III.3.5.3.1 Maintenance palliative

“ Activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Appelée d'actions à caractère provisoire qui devront être suivies d'actions curatives.” Couramment dépannage, cette maintenance palliative est principalement constituée

III.3.5.3.2 Maintenance curative

“Activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent. Ces activités peuvent être des réparations, des modifications ou aménagements ayant pour objet de supprimer la ou les défaillances.”

CHAPITRE IV : Analyse AMDEC

IV.1 Introduction

L'analyse des modes de défaillance, leurs effets et leurs effet criticité (AMDEC) est un outil de qualité pour l'analyse préventive afin d'identifier et de traiter les causes potentielles de défauts et de défaillances avant qu'elles ne surviennent. Du fait de la mutualisation des informations et des données, la méthode AMDEC est une méthode de travail rigoureuse et très efficace. Il se déroule en petits groupes et permet à chaque participant d'apporter sa propre expérience et ses connaissances.

IV.2 Objectif de AMDEC

L'AMDEC à plusieurs buts et objectif :

- Crée la documentation des systèmes d'aide au diagnostic.
- Détermine les points faibles d'un système.
- Analyser les conséquences sur l'environnement.
- La sureté de fonctionnement.
- Prévoir le plan de la maintenance corrective et préventive, et les pièces de rechange.

IV.3 Type de l'AMDEC

Il existe trois principaux types de l'AMDEC, qui sont relievés aux différentes fonctions du système de production.

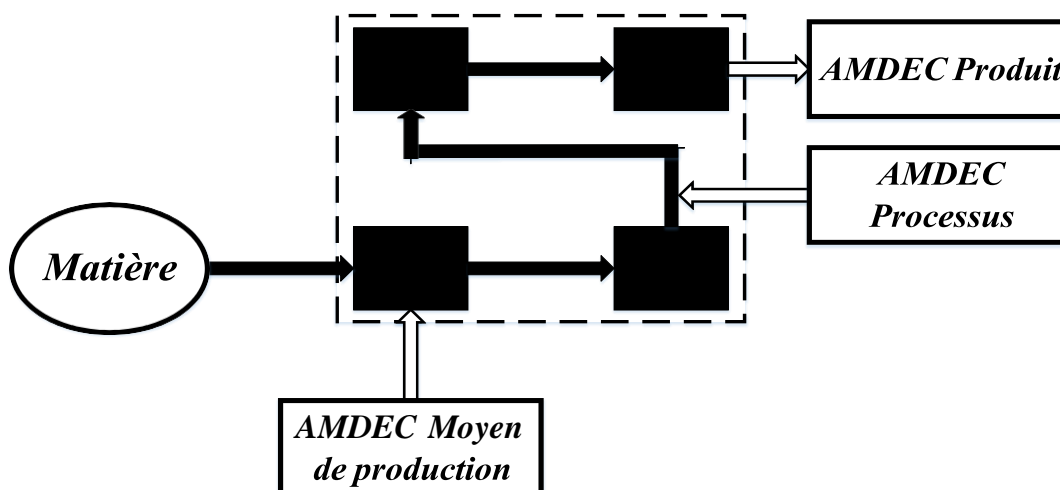


Figure IV-1:types de l'AMDEC.

IV.3.1 AMDEC Moyen de production

L'AMDEC moyen de production est conçue pour identifier les défaillances potentielles pouvant survenir dans le système de production.

Les résultats de cette analyse serviront à établir des plans de gestion des risques pour rendre les outils industriels plus fiables et plus robustes.

Il permet de:

- Assurer la disponibilité du moyen de production.
- Respecter l'environnement et la sécurité des biens et des personnes.
- Créé des documentations de maintenance efficace.
- Contrôler la qualité du produit.
- Maintenance services est le principal animateur de ce type d'AMDEC. On découvre ici l'importance de considérer la maintenance de la conception.
- La mise en place des trois types d'AMDEC permet le rapprochement et le décloisonnement fonctionnel de la production, de la maintenance et de la qualité au sein des groupes participants.

IV.3.2 L'AMDEC processus

S'applique aux procédés de fabrication pour analyser et évaluer la criticité de toutes les défaillances potentielles des produits causées par leurs procédés. Il peut également être utilisé pour les postes de travail.

Permet de:

- Assurer la qualité du processus.
- Déterminer les machines critiques.
- Contrôler la qualité de produit.

IV.3.2.1 L'AMDEC produit

Est utilisée pour étudier en détail la phase de Conception du produit ou d'un projet.

Permet de:

- Valider les objectifs du cahier des charges.
- Assurer la sureté de fonctionnement du produit par rapport aux attentes de client.
- Contrôler la qualité du produit.
- Aide à établissement des spécifications de capacité de processus et caractéristiques matières.

IV.4 Principe de la méthode

L'élaboration des dossiers AMDEC doit passer par une étape amont qui consiste à préparer les entités à l'analyse par décomposition fonctionnelle selon une méthode d'analyse fonctionnelle. Après avoir décomposé une entité en sous-systèmes ou parties (selon le niveau de décomposition utilisé), chacun de ces modèles doit passer par les étapes suivantes.

IV.4.1 Analyse fonctionnelle

Les méthodes d'analyse fonctionnelle sont essentielles pour la décomposition fonctionnelle et matérielle d'une installation industrielle en cours de conception ou en exploitation.

L'utilisation de ces méthodes, par leur caractère systématique et exhaustif, apporte une garantie formelle de désagrégation des installations industrielles. L'échelle fonctionnelle et matérielle nécessaire pour identifier les modes de défaillance ayant un impact sur les objectifs opérationnels retenus par l'usine ou l'équipement associé. L'analyse fonctionnelle permet d'identifier toutes les fonctions d'un système en termes de relation avec son environnement.

Les trois étapes de la démarche sont:

- Analyse des exigences du produit ou du système.
- Études environnementales,
- pour déterminer la fonctionnalité et les éléments nécessaires de l'équipement.

Seule une analyse fonctionnelle externe est effectuée séquentiellement, au cours de laquelle n traite le dispositif comme une boîte. Nous utilisons une représentation graphique simplifiée.

Cette analyse permet d'exprimer la composition fonctionnelle des médiateurs extérieurs au système. Une ou plusieurs fonctions principales et fonctions de contrainte sont définies de telle sorte que le système satisfait à la sécurité, comme un environnement avec certaines contraintes d'utilisation. Les résultats de l'analyse fonctionnelle sont matérialisés par un schéma fonctionnel (BDF).

IV.4.2 Analyse de défaillance

Pour tous les éléments de l'arborescence, étudiez tour à tour le mode, l'effet et la cause de la défaillance. En règle générale, nous examinons également le mode de détection (le cas échéant). Reconnaissance du mode de défaillance : Un mode de défaillance est une caractéristique perceptible ou une observation d'une défaillance. Cette phase consiste à

identifier le plus complètement possible tous les modes de défaillance possibles et potentiels de l'entité analysée.

IV.4.2.1 Rechercher les causes de la défaillance

Viser l'exhaustivité à ce stade est illusoire, mais une technique très efficace pour trouver la cause réside dans l'utilisation d'outils de travail en groupe bien connus : l'analyse en arête de poisson ou les diagrammes d'Ishikawa. Créez un diagramme par mode de défaillance pour regrouper les causes interdépendantes sur le diagramme de manière arborescente.

IV.4.2.2 Etude des effets

Chaque mode de défaillance a un impact, c'est-à-dire un impact sur un système fonctionnel, suivant ou environnemental. Le choix du niveau de recherche et des objectifs permet de définir les impacts à considérer. Certains fabricants définissent l'effet comme "ce que les clients remarqueront en cas de panne".

IV.4.2.3 Recensement des moyens de détection existant

Il s'agit de l'ensemble des moyens prévus, soit pour prévenir la cause, soit pour détecter la défaillance (validation, inspection, points d'arrêt précisés dans la procédure, etc.). Ces méthodes doivent être précisées dans la colonne Symptômes physiques avant défaillance ou dans la colonne Recommandation précisant les actions à mener (contrôles, mesures, etc.) afin de détecter les anomalies à une phase précoce.

IV.4.2.4 Hiérarchisation des défaillances

Le grand nombre de défaillance répertoires et analysées lors de la phase précédente nécessite d'introduire une certaine hiérarchisation afin de pouvoir isoler les plus « critique », c'est-à-dire celles qu'il va falloir éliminer en envoyant la conception du système. Pour réaliser cette hiérarchisation, on utilise des grilles de criticité. Une défaillance sera d'autant plus critique son apparition sera difficile. On définit donc un indice comprenant quatre niveaux (ou plus, si l'on possède des informations précises) pour la fréquence, la gravité et la non détection de défaillance.

IV.4.2.5 Estimation des facteurs de fréquence, gravité et non détection

Il s'agit ici d'outils de quantification, puis à attribuer une note à chacun de ces critères. On utilise en général :

- **La fréquence d'apparition F** : C'est la probabilité pour la cause se produise et quelle entraîne le mode de défaillance concerné.

Tableau IV-1:tableau de fréquence F.

Valeurs de F	Fréquence d'apparition de la défaillance
1	Il y a peu de pannes sur des unités similaires en fonctionnement, avec un maximum d'une panne sur la durée de vie de l'unité.
2	Peu de pannes du même type d'équipements présents en fonctionnement (ex : une panne par an) Ou une partie intégrante d'une nouvelle technologie qui remplit théoriquement toutes les conditions pour éviter les pannes, mais n'a aucune expérience avec des équipements similaires.
3	Problèmes occasionnels Équipements similaires en fonctionnement (Exemple : un défaut par trimestre).
4	Défaillances fréquentes sur des composants connus ou des équipements similaires existants (ex : échecs mensuels) ou une partie intégrante d'une nouvelle technologie qui ne remplit pas toutes les conditions de prévention des défaillances et n'a aucune expérience avec un équipement similaire

- **La gravité G:**

Tableau IV-2 : tableau de la gravité G

Valeurs de G	La gravité de la défaillance
1	Panne mineure : pas de dégradation notable Matériel (Exemple : T < 10 minutes).
2	Une panne modérée nécessite une réparation état transitoire (par exemple 10 minutes < T < 30 minutes).
3	Défaillances critiques nécessitant une intervention Longue durée (ex. 30 minutes < T < 90 minutes) Où Produit non conforme, trouvé et corrigé par les utilisateurs des moyens de production.

4	Défaillance catastrophique très critique, nécessitant Grandes interventions (ex. T > 90 minutes) Où Le produit indiqué par le client n'est pas qualifié En aval (à l'intérieur de l'entreprise) Où Dégâts matériels importants (sécurité des biens).
5	Sécurité/Qualité : Accidents possibles Des problèmes de sécurité personnelle surviennent lors de pannes ou d'interventions Où Les produits expédiés aux clients ne sont pas conformes

- **Le risque de non détection :**

Tableau IV-3: le risque de non détection.

Valeurs de D	Le risque de non détection de la défaillance
1	Mesures prises pour assurer la détection somme des causes ou voies initiales panne, évitant ainsi le plus Défaillances graves dans le processus de production.
2	Il y a des signes avant-coureurs d'échec Mais il y a un risque que le signe passe inaperçu opérateur. La détection est disponible. éviter les pannes, mais n'a aucune expérience avec des équipements similaires.
3	Causes et/ou schémas de défaillance difficiles à détecter ou à détecter les composants Rarement utilisé. La detection est faible
4	Aucune panne détectée auparavant L'effet ne se produit pas : cette condition n'est pas détectée

IV.5 Détermination de la criticité

La criticité est la résultante des facteurs des risques étudiés ci-dessus. On la, determine concrètement par le produit :

$$C = F . G . D$$

Cet indice est parfois dénommé (IPR) indice de priorités des risques. Il permet d'établir une hiérarchie des risques. Plus l'indice de criticité est grand, plus le risque lié à la défaillance potentiel l'est élevé.

IV.6 Détection des actions correctives menées

Les défaillances sont alors rassemblées sur une matrice de criticité qui permet de visualiser les défaillances les plus critiques en fonction de leur indice de criticité.

En phase de conception d'un système, le cahier des charges fixe une valeur maximale tolérable de la criticité que l'on peut reporter. Les défaillances qui conduisent à une obligation de reprise de conception apparaissent ainsi très clairement. Un responsable est chargé de chaque défaillance à éliminer, et ces données peuvent être inscrites dans de nouvelles colonnes de la grille AMDEC.

IV.7 Conclusion

Grâce à ce chapitre nous avons appris à diagnostiquer les défauts dans les meilleurs délais et avec une grande qualité en les organisant dans un tableau et en déterminant les types de défauts et la manière de les corriger, ce qui est une méthode très stricte et efficace.

Chapitre V: Analyse des défaillances des machine

V.1 Introduction

Étant donné que la problématique étudiée dans ce travail est l'amélioration de la sécurité des lignes de production au niveau de l'entreprise (BRIQUETERIE IZERKHEF), notre étude est basée sur la classification des moquettes, en utilisant une méthode d'autorisation de suivi du temps indisponible dans une entreprise appelée : AMDEC

V.2 Étude FMD de la chaîne de production

Notre étude est réalisée selon tableau d'intervention pendant l'année 2021

V.3 Méthode ABC

Tableau V-1: Méthode ABC de l'indisponibilité.

ZONE	N,Panne	TTR	MTTR	TBF	MTBF
Dépilage	1611	3056,05	1,89	5679,95	3,53
Mouleuse	1131	874,91	3,47	7861,09	4,25
Coupeur	1283	566,41	3,50	8169,59	3,31
Empilage	627	552,09	8,05	8183,91	5,89
Séchoire	3	16,95	1688,80	8719,05	1227,19
Four	2	9,5	2537,95	8726,5	1836,04

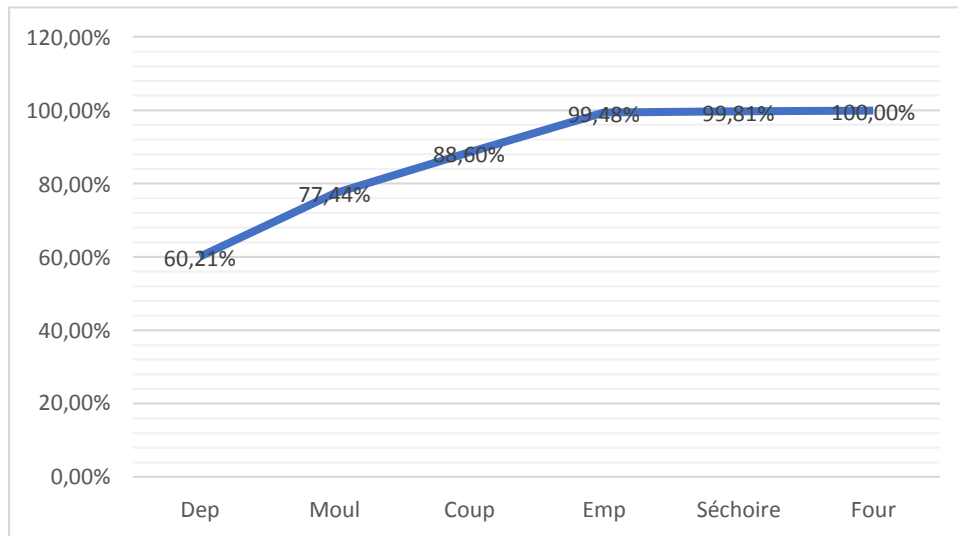


Figure V-1:ABC de l'indisponibilité.

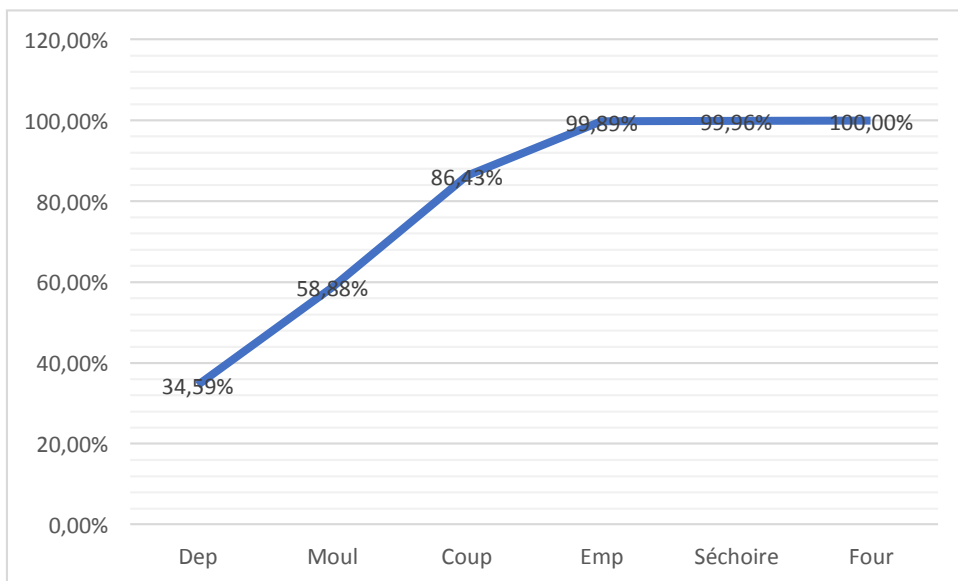


Figure V-2:ABC de nombre de panne.

V.4 Étude de fiabilité

On a la fonction de fiabilité :

$$R = e^{-\lambda t}$$

Avec : $\lambda = \frac{1}{MTBF}$

Tableau V-2: Tableau de fiabilité

ZONE	TBF	MTBF	λ	R(t)
Depilage	5679,95	3,533	0,52716	0
Mouleuse	7861,09	4,259	0,287716	0
Coupeur	8169,59	3,313	0,285278	0
Empilage	8183,91	5,899	0,124172	0
Séchoire	8719,05	1227,197	0,000592	0,00563
Four	8726,5	1836,045	0,000394	0,03185

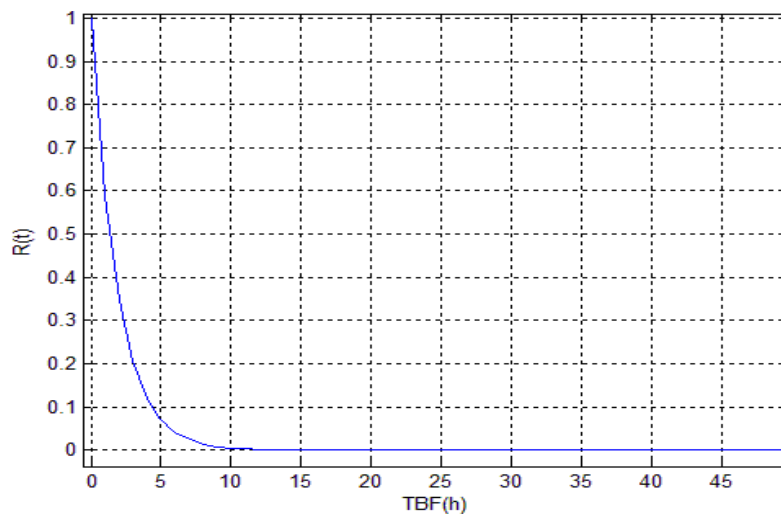


Figure V-3 : Fiabilité de dépilage.

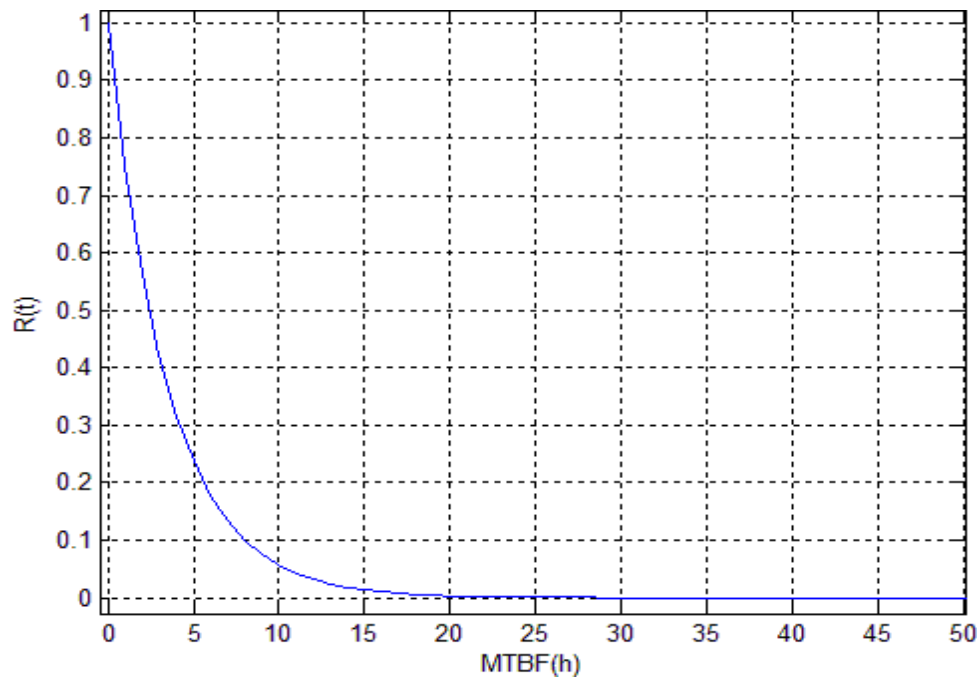


Figure V-4:Fiabilité de mouleuse.

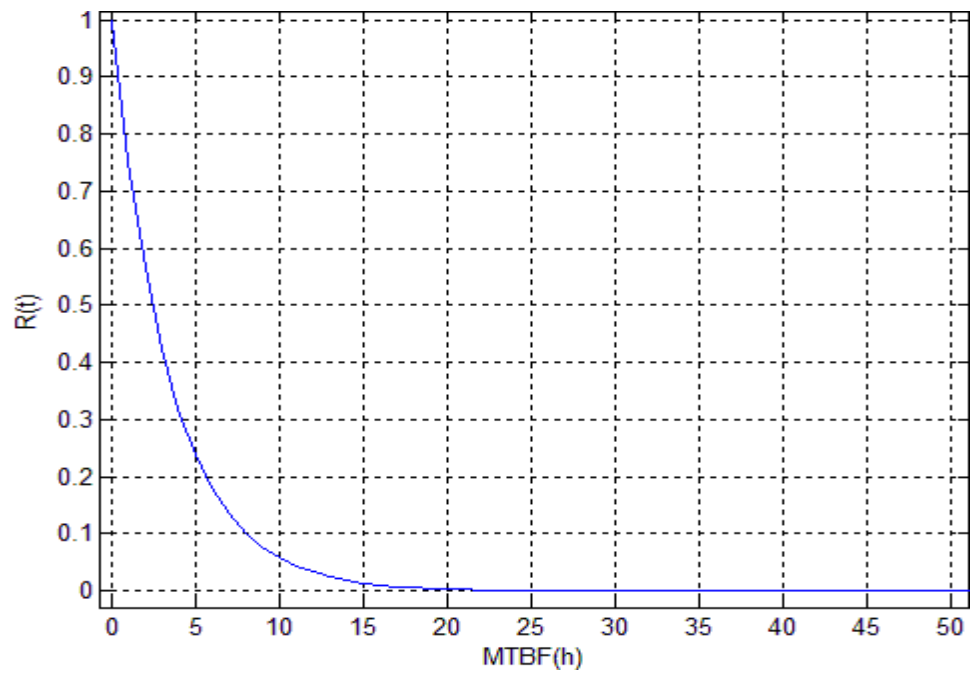


Figure V-5:Fiabilité de coupeur.

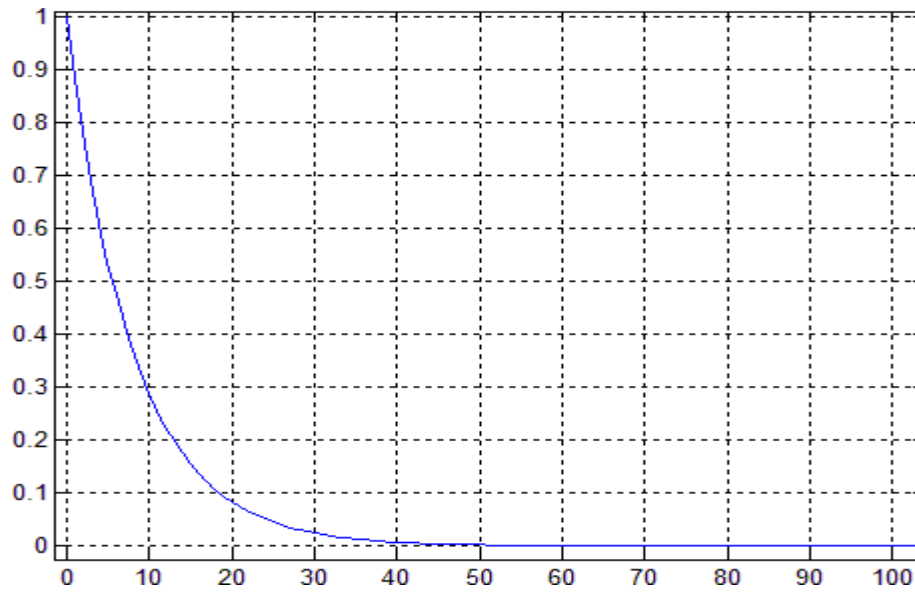


Figure V-6: Fiabilité empilage.

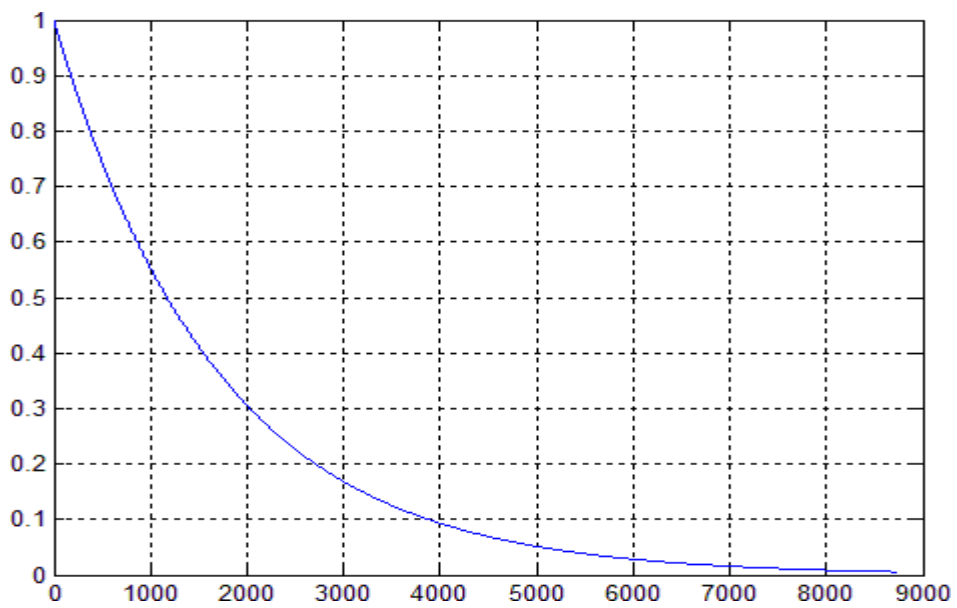


Figure V-7: Fiabilité du séchoir.

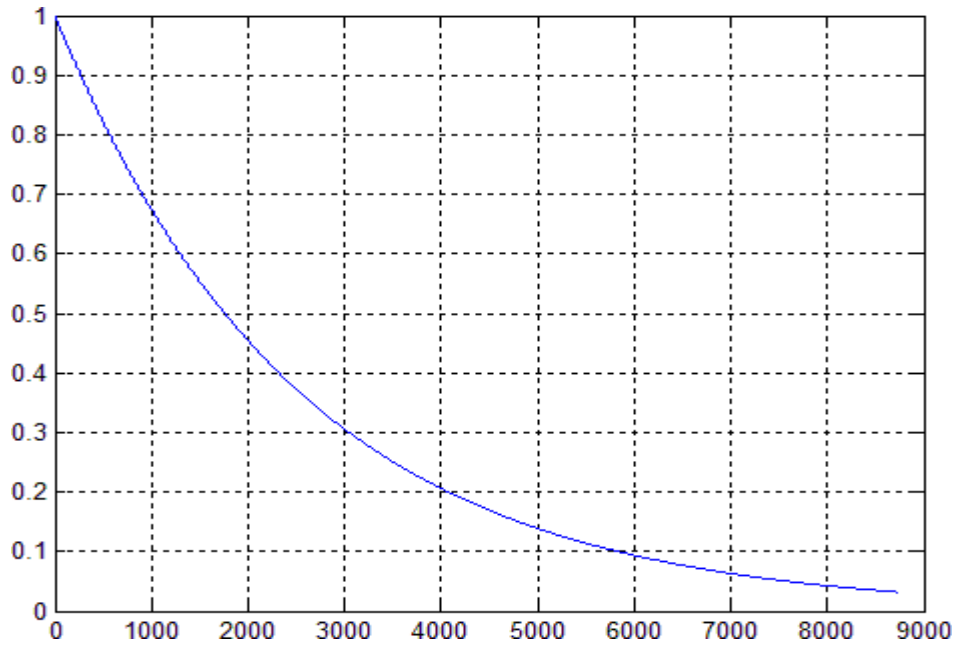


Figure V-8:Fiabilité du four.

V.5 Étude de maintenabilité

On a:

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

Avec: $\mu(t) = \frac{1}{MTTR}$

Tableau V-2:Tableau de maintenabilité.

ZONE	TTR	MTTR	μ
Dépilage	3056,05	1,8969584	0,28303
Mouleuse	874,91	3,4756499	0,23479
Coupeur	566,41	3,5053546	0,30184
Empilage	552,09	8,0533652	0,16953
Séchoire	16,95	1688,8033	0,00081
Four	9,5	2537,955	0,00054

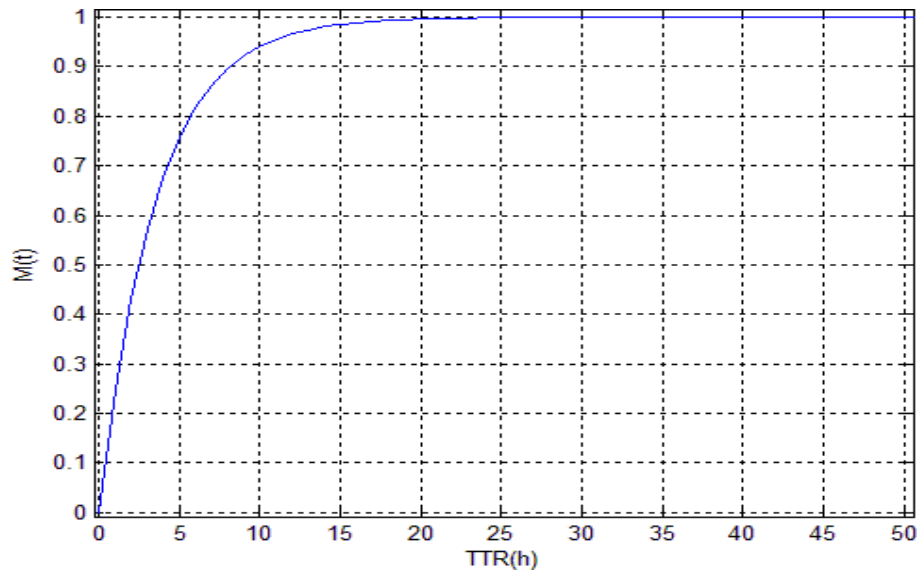


Figure V-9: Maintenabilité de dépilage.

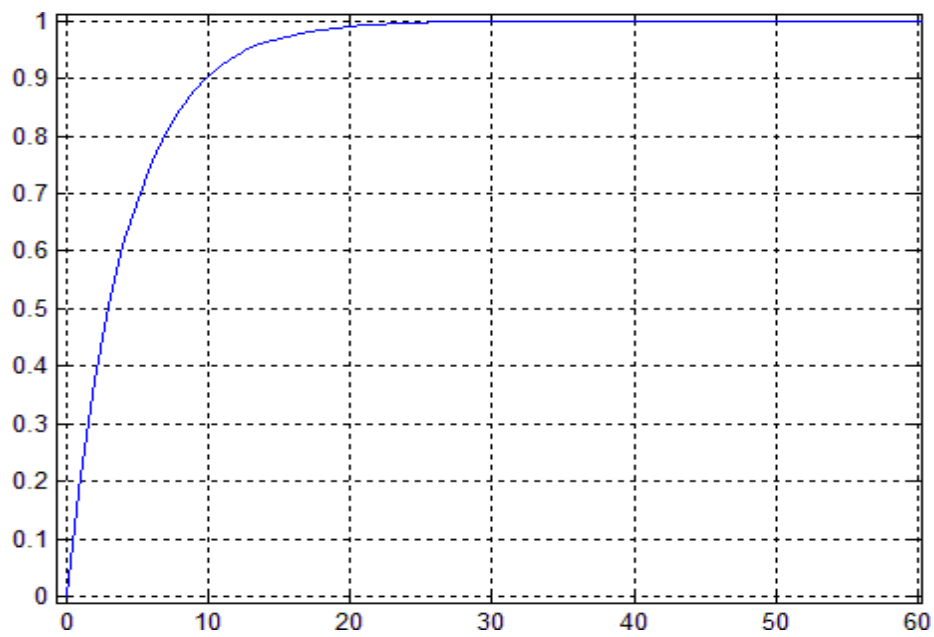


Figure V-10: Maintenabilité de mouleuse.

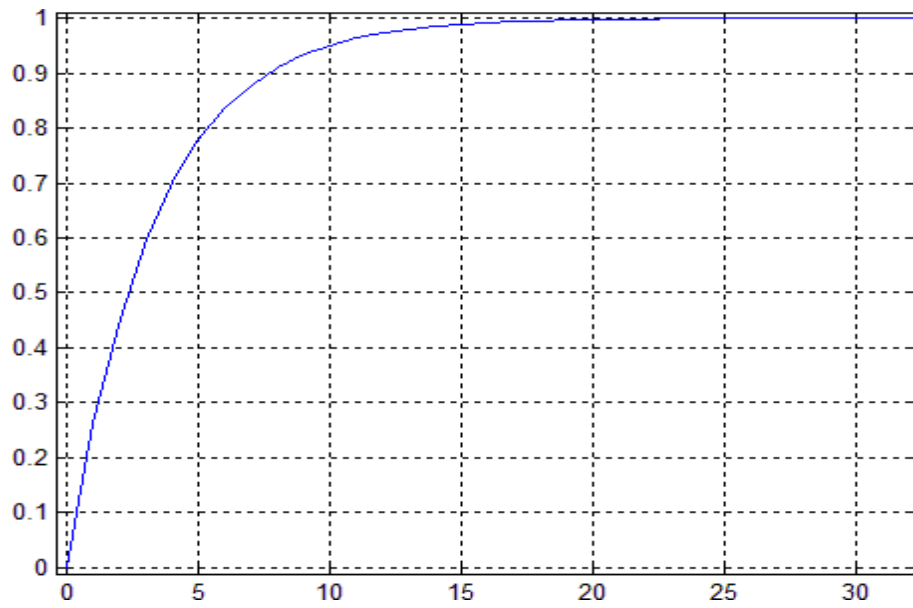


Figure V-11: Maintainabilité de coupeur.

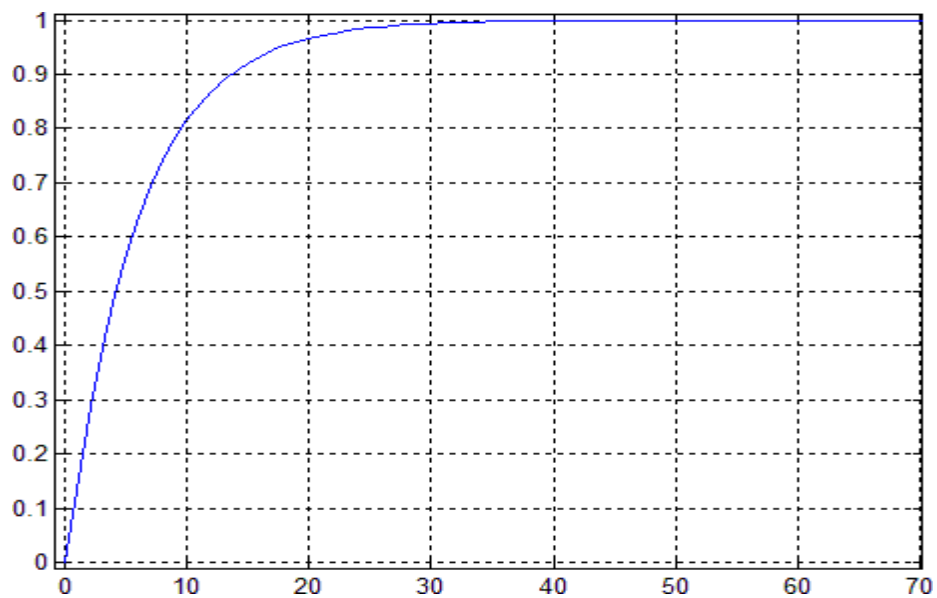


Figure V-12: Maintainabilité d'empilage.

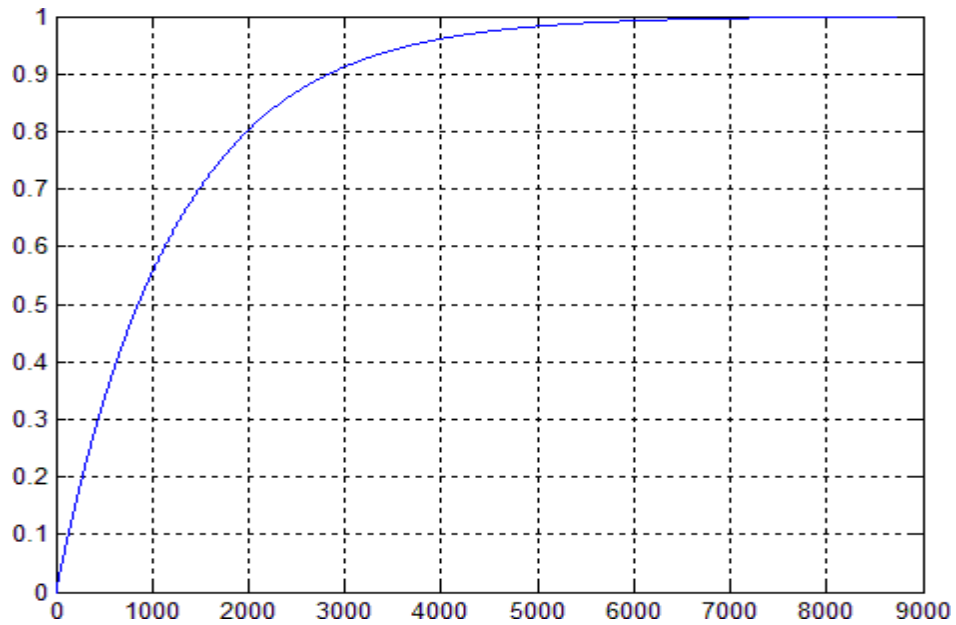


Figure V-13: Maintenabilité de séchoir .

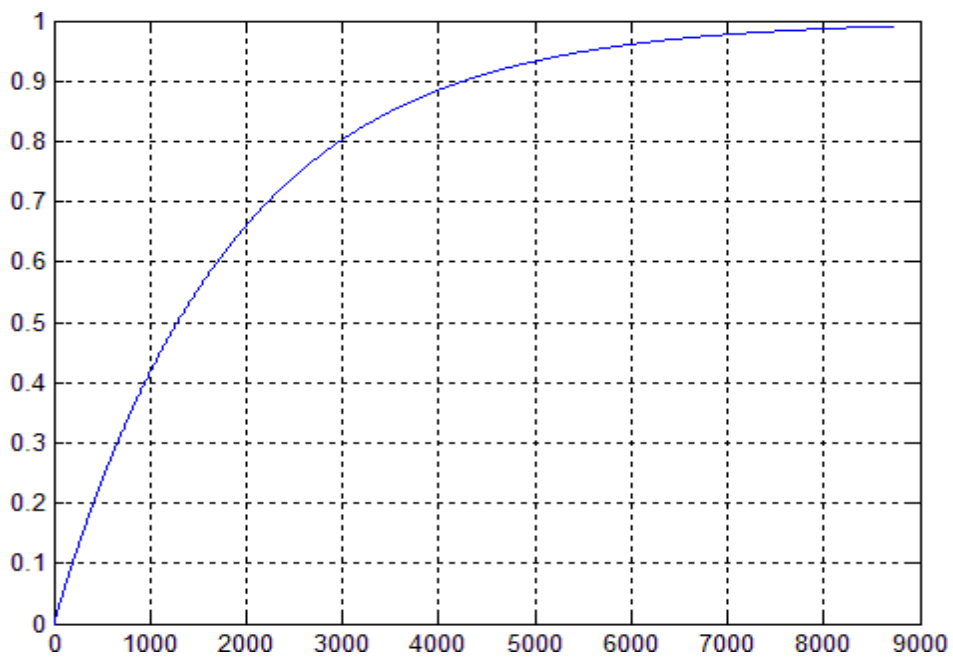


Figure V-14: Maintenabilité de four.

V.6 Étude de disponibilité

La disponibilité intrinsèque:

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

La disponibilité instantanée:

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

La disponibilité asymétrique:

$$A_\infty = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu}}$$

La disponibilité moyenne:

$$D_0 = \frac{T.C.B.F}{T.C.B.F + T.C.I}$$

Tableau V-3:tableau de disponibilité.

ZONE	λ	μ	D_i	$D(t)$	D_0	A_∞
Dépilage	0,52716	0,28303	0,65066	0,34934	0,65018	0,3493390
Mouleuse	0,287716	0,23479	0,55064	0,44936	0,77501	0,4493553
Coupeur	0,285278	0,30184	0,4859	0,5141	0,8284	0,5141027
Empilage	0,124172	0,16953	0,42279	0,57721	0,8555	0,5772131
Séchoir	0,000592	0,00081	0,42085	0,57915	0,88401	0,5791507
Four	0,000394	0,00054	0,41976	0,58035	0,90316	0,5802366

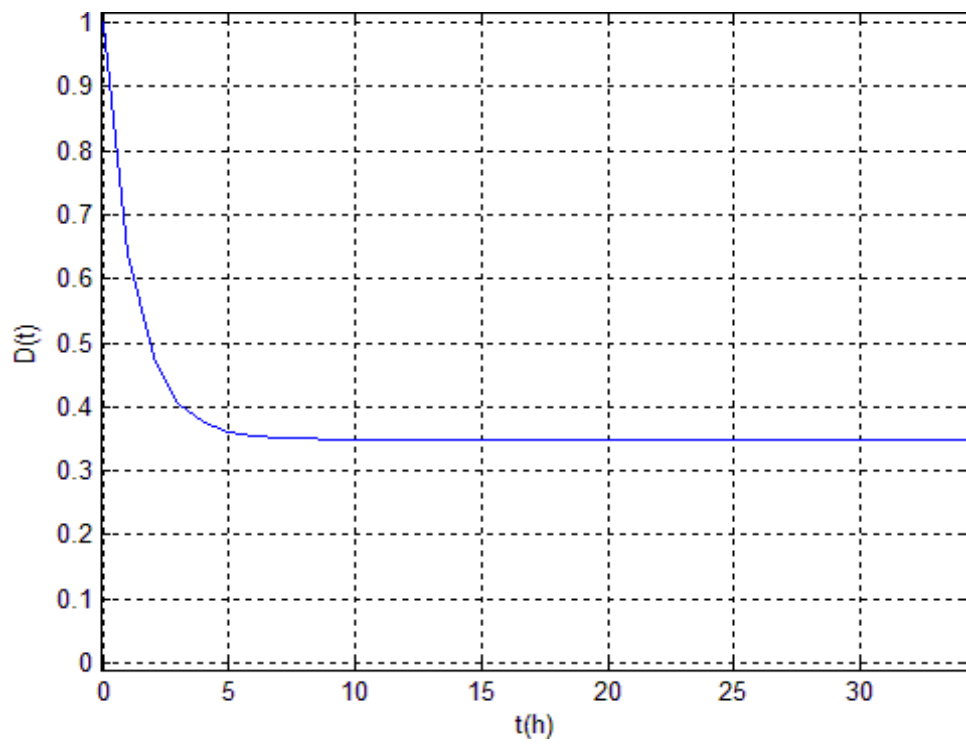


Figure V-15:Disponibilité de dépilage.

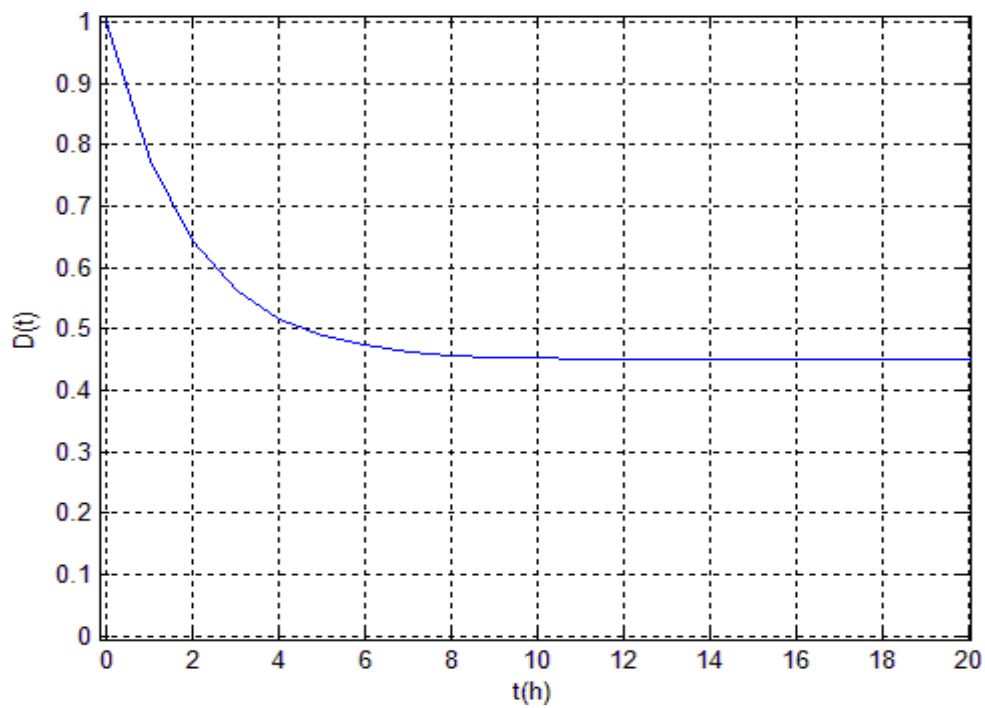


Figure V-16:Disponibilité de mouleuse.

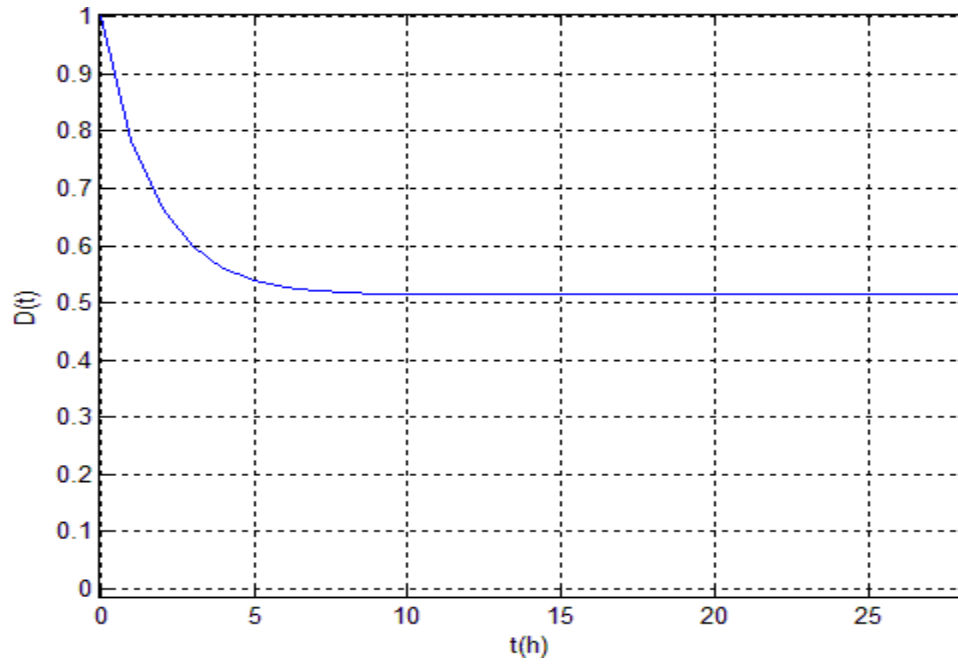


Figure V-17:Disponibilité de coupeur.

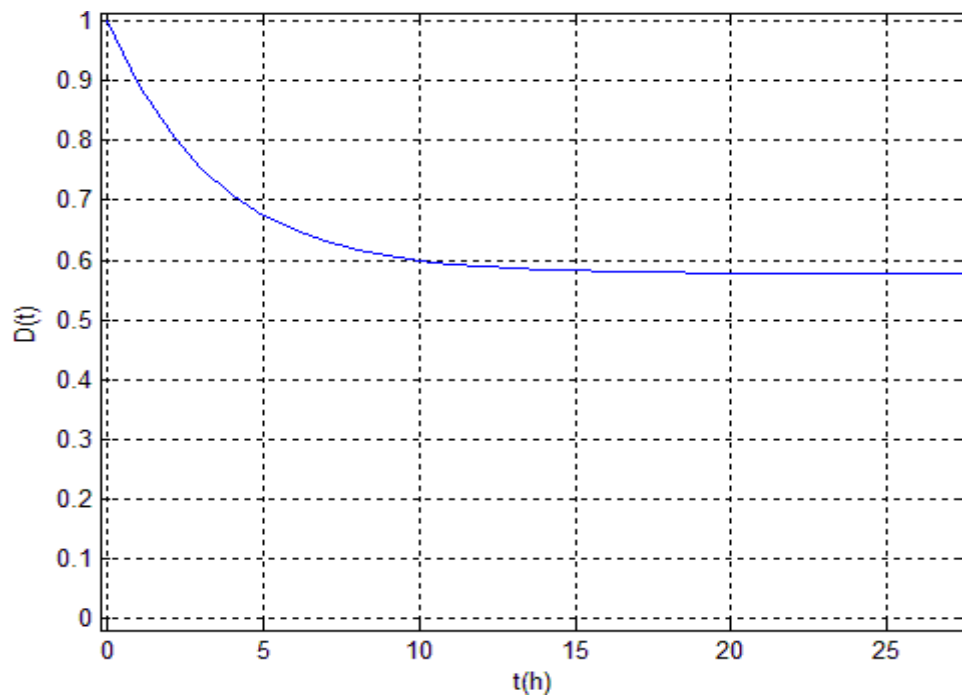


Figure V-18:Disponibilité d’empilage.

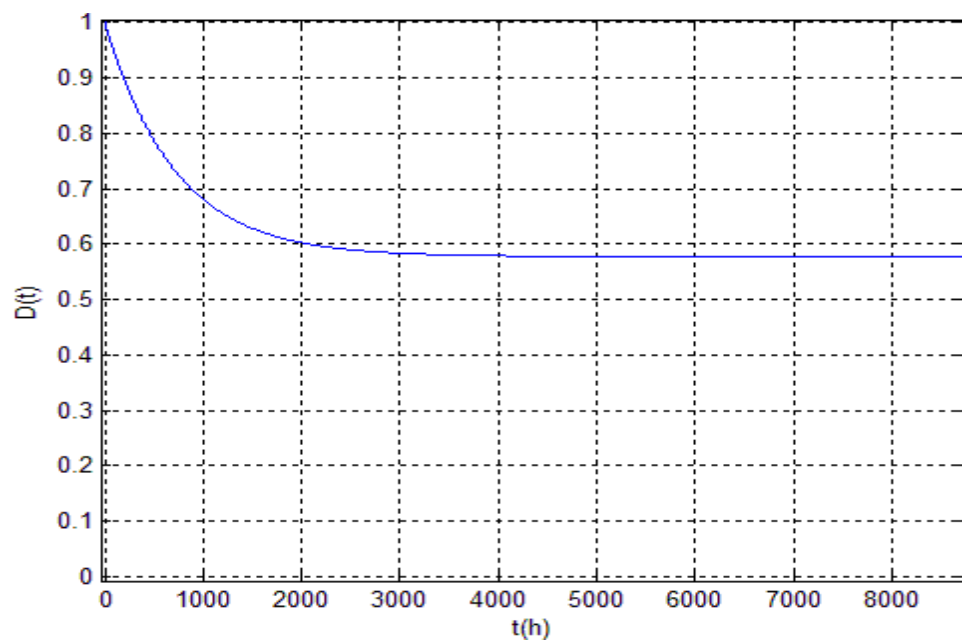


Figure V-19:Disponibilité de séchoir.

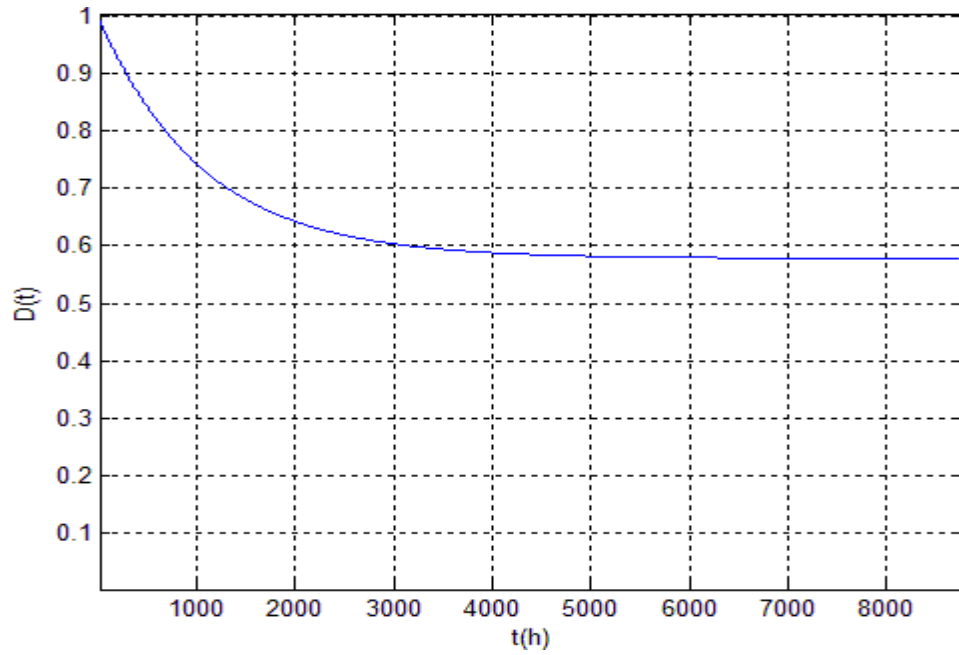


Figure V-20:Disponibilité de four.

V.7 Étude AMDEC:

System : coupure			Cycle de fonctionnement (3×8)							
Sous système : système tapis n : 01										
Élément	Fonction	Mode	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action correctif
						F	G	D	C	
Système tapis roulant	Transporté l'argile moulé	Arrêt définitif de coupure	Blocage mécanisme de tapis	Non réalisation du programme de production	Visuelle	4	4	4	64	Réglage des défaut mécanique

Tableau V-4:AMDEC système rédacteur tapis roulant m1ch

System : coupure										Cycle de fonctionnement (3×8)			
Sous système : système rédacteur tapis roulant m1ch													
Élément	Fonction	Mode	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action correctif			
						F	G	D	C				
Système Rédacteur	Transmission est inférieure à 1 pour augmenter le couple moteur tapis01d'une rotation ou pour réduire la vitesse	Arrêt définitif de coupure	Blocage mécanisme de tapis	Non réalisation du programme de production	Visuelle	1	3	4	12	Réglage des défaut mécanique			

Tableau V-5:AMDEC système tapis roulant décharge.

System : empilage										Cycle de fonctionnement (3×8)			
Sous système : système tapis roulant décharge (changement roulant)													
Élément	Fonction	Mode	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action correctif			
						F	G	D	C				
Système tapis roulant	Transporté brique moulé	Arrêt définitif dépilage	Blocage mécanisme de tapis	Non réalisation du programme De production	Visuelle	3	4	4	48	Réglage des défaut mécanique			

Tableau V-6:AMDEC cerceuse V1 et V2.

System : Dépilage											Cycle de fonctionnement (3x8)			
Sous système : cerceuse V1 et V2														
Élément	Fonction	Mode	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action correctif				
						F	G	D	C					
Cerceuse automatique de palette de brique	Emballer les palettes de brique	Arrêt définitif de la ligne dépilage	Blocage mécanisme de cerceuse	Non réalisation du programme De production	Visuelle	4	3	4	48	Réglage des défaut mécanique				

Tableau V-7:AMDEC cerceuse V1 et V2.

System : Dépilage											Cycle de fonctionnement (3x8)			
Sous système : cerceuse V1 et V2														
Élément	Fonction	Mode	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action correctif				
						F	G	D	C					
Cerceuse automatique de palette de brique	Emballer les palettes de brique	Arrêt répétitif de ligne de dépilage	Nettoyage des cerceuse	Arrêt repetitive de l'installation	Visuelle	4	2	1	8	Nettoyage des cerceuse plain de brique cassé				

Tableau V-8:AMDEC convoyeur à rouleaux

Système : Dépilage		Cycle de fonctionnement (3x8)								
Sous-système : convoyeur à rouleaux										
Élément	Fonction	Mode	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action correctif
						F	G	D	C	
Système convoyeur à rouleaux	Transporter les palettes de brique	Arrêt définitif de la ligne dépilage	Panne électrique du convoyeur	Non réalisation du programme de production	Visuelle	3	2	4	24	Réglage du capteur et de système moteur-réducteur

Tableau V-9:AMDEC cerceuse ligne A

System : Dépilage		Cycle de fonctionnement (3x8)								
Sous système : cerceuse ligne A										
Élément	Fonction	Mode	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action correctif
						F	G	D	C	
Cerceuse automatique de palette de brique	Emballer les palettes de brique	Arrêt définitif de la ligne A	Panne électrique de cerceuse	Non réalisation du programme de production	Visuelle	4	3	4	48	Réglage du capteur et du système moteur-réducteur

Tableau V-10:: AMDEC cerceuse ligne B.

System : Dépilage		Cycle de fonctionnement (3x8)								
Sous système : cerceuse ligne B										
Élément	Fonction	Mode	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action correctif
						F	G	D	C	
Cerceuse automatique de palette de brique	Emballer les palettes de brique	Arrêt répétitif de ligne de B	Panne électrique de cerceuse	Non réalisation du programme De production	Visuelle	4	3	4	48	Réglage du capteur et du système moteur-réducteur

Tableau V-11:AMDEC Pince de dépilage

Système : Dépilage		Cycle de fonctionnement (3x8)								
Sous-système : Pince de dépilage										
Élément	Fonction	Mode	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action correctif
						F	G	D	C	
Système de Dépilage du wagon de brique	Dépiler le wagon de brique	Arrêt définitif de la ligne de dépilage	Blocage mécanique de cerceuse	Non réalisation du programme de production	Visuelle	4	3	4	8	Réglage des défauts mécaniques

Tableau V-12:AMDEC Séparation ligne A

System : Dépilage		Cycle de fonctionnement (3×8)								
Sous système : Séparation ligne A										
Élément	Fonction	Mode	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action correctif
						F	G	D	C	
Système de séparation de la brique	Séparer des briques dans des paquets	Arrêt définitif de la ligne A	Blocage mécanique de système séparation	Non réalisation du programme de production	Visuelle	4	2	4	32	Réglage des défauts mécaniques

Tableau V-13:AMDEC Séparation ligne B.

System : Dépilage		Cycle de fonctionnement (3×8)								
Sous système : Séparation ligne B										
Élément	Fonction	Mode	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action correctif
						F	G	D	C	
Système de séparation de la brique	Séparer des briques dans des paquets	Arrêt définitif de la ligne B	Blocage mécanique de système séparation	Non réalisation du programme de production	Visuelle	4	2	4	32	Réglage des défauts mécaniques

Tableau V-14:AMDEC pince de paquetisation.

Système : Dépilage		Cycle de fonctionnement (3x8)								
Sous-système : pince de paquetisation										
Élément	Fonction	Mode	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action correctif
						F	G	D	C	
Système pince de paquetisation	Pince de paquetisation	Arrêt définitif de la ligne dépilage	Blocage mécanisme de système séparation	Non réalisation du programme de production	Visuelle	3	3	4	36	Réglage des défaut mécanique

Tableau V-15:AMDEC système tapis roulant décharge.

System : empilage		Cycle de fonctionnement (3x8)								
Sous système : système tapis roulant décharge (changement roulant)										
éléme nt	fonctio n	mode	cause	effet	déTECTIO n	criticité				Action correctif
						F	G	D	C	
Syste m tapis roulan t	Transpo rt brique moulé	Arrêt définiti f dépilag e	Blocage mécanism e de tapis	Non réalisatio n du program me de productio n	visuelle	3	4	4	4	Réglage des défaut mécanique

Tableau V-16 : AMDEC Pompe à vide

System : mouleuse										Cycle de fonctionnement (3×8)			
Sous système : Pompe à vide													
élément	fonction	mode	cause	effet	détection	criticité				Action correctif			
						F	G	D	C				
Pompe à vide	Bien presser le mélange de l'argile	Arrêt définitif de la mouleuse	Panne mécanique	Non réalisation du programme de production	visuelle	4	3	4	48	Réglage des défaut mécanique			

Tableau V-17:AMDEC malaxeur.

System : mouleuse										Cycle de fonctionnement (3×8)			
Sous système : malaxeur													
élément	fonction	mode	cause	effet	détectio n	criticité				Action correctif			
						F	G	D	C				
Malaxeur	Mélange r l'argile et le sable	Arrêt définitif du mouleuse	Changemen t de chemise de malaxeur	Non réalisation du programme de production	visuelle	4	4	4	64	Changement de chemise de malaxeur de but de bon fonctionnemen t			

Tableau V-18:AMDEC chambre à vide

System : mouleuse						Cycle de fonctionnement (3×8)				
Sous système : chambre à vide										
élément	fonction	mode	cause	effet	détection	criticité				Action correctif
						F	G	D	C	
Chambre a vide	Bien presser le mélange de l'argile	Arrêt définitif de la mouleuse	Panne mécanique	Non réalisation du programme de production	visuelle	4	3	4	48	Changement de chemise de malaxeur

Tableau V-19:AMDEC chambre à vide

System : mouleuse						Cycle de fonctionnement (3×8)				
Sous système : chambre à vide										
Élément	Fonction	Mode	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action correctif
						F	G	D	C	
Chambre a vide	Bien presser le mélange de l'argile	Arrêt répétitif du mouleuse	Nettoyage	Non réalisation du programme de production	Visuelle	4	2	1	08	Nettoyage de la chambre à vide

Tableau V-20:AMDEC moule.

System : mouleuse						Cycle de fonctionnement (3×8)				
Sous système : moule										
Élément	Fonction	Mode	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action correctif
						F	G	D	C	
Filière de moule	Le moule	Arrêt répétitive de mouleuse	Changement de filière de moule	Non réalisation du programme de production	Visuelle	4	3	1	12	Changement de filière de moule entre B8 et B12

Tableau V-21:AMDEC chambre à vide

System : mouleuse						Cycle de fonctionnement (3×8)				
Sous système : chambre à vide										
Élément	Fonction	Mode	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action correctif
						F	G	D	C	
Chambre a vide	Bien presser le mélange de l'argile	Arrêt définitif de la mouleuse	Vérification de la chambre à vide	Non réalisation du programme de production	Visuelle	4	3	1	12	Réglage de la chambre à vide

V.8 Conclusion

La gestion du positionnement doit occuper une place centrale au sein des activités d'ingénierie de l'entreprise. Elle ne devrait plus être perçue comme une contrainte, mais plutôt comme un moyen efficace d'améliorer la production en termes de volume et de rentabilité, tout en favorisant des conditions de travail optimales et une sécurité renforcée. Un entretien de haute qualité peut engendrer des coûts supplémentaires, mais l'absence d'un entretien planifié :

- Peut entraîner des périodes d'indisponibilité des machines.
- Peut entraîner la production de produits de qualité inférieure.
- Peut compromettre la sécurité des opérations.

Conclusion générale

Par conséquent, le rôle crucial de la maintenance consiste à minimiser les pannes et à prolonger la durée de vie des équipements grâce à des approches techniques, administratives et de gestion. Étant donné l'importance des machines dans l'industrie des briques réfractaires, notamment les compresseurs qui doivent fonctionner de manière optimale, les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans le cadre de l'amélioration des paramètres de sécurité opérationnelle au sein de certaines étapes de la chaîne de production.

Les paramètres de fiabilité (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité) revêtent une importance capitale, car ils sont des facteurs déterminants dans l'amélioration des performances des équipements. Ainsi, notre recherche s'appuie sur les deux outils suivants :

- Une analyse approfondie de la fiabilité des lignes de production des briqueteries.
- Une recherche qualitative visant à optimiser les performances de ces procédés.

Les résultats obtenus mettent en évidence que les paramètres de fonctionnement des (fiabilité, maintenabilité, disponibilité) sont en deçà des objectifs fixés par l'entreprise. En rapport avec la stratégie de maintenance appliquée à la chaîne de production, il est évident que ces efforts ne sont pas suffisants pour atteindre une performance maximale.

L'évaluation de la fiabilité des systèmes électromécaniques est une étape cruciale dans la conception, la gestion et la maintenance de ces systèmes complexes. Cette évaluation vise à garantir que ces systèmes fonctionnent de manière sécurisée, efficace et sans interruption. Voici une conclusion générale sur l'évaluation de la fiabilité des systèmes électromécaniques dans cette entreprise BRIKETERIE IZERKHEF :

Garantie de la Performance: L'évaluation de la fiabilité est essentielle pour s'assurer que les systèmes électromécaniques fonctionnent conformément à leurs spécifications, fournissant ainsi des performances cohérentes et fiables.

Sécurité Opérationnelle : Une évaluation fiable garantit que les systèmes électromécaniques ne présentent pas de risques pour la sécurité des opérateurs, des travailleurs et du public, en minimisant les défaillances potentielles qui pourraient entraîner des accidents.

Optimisation de la Maintenance : L'évaluation de la fiabilité permet de planifier des activités de maintenance préventive, réduisant ainsi les temps d'arrêt imprévus et les coûts associés à des réparations d'urgence.

Durabilité et Longévité : Elle contribue à prolonger la durée de vie des systèmes électromécaniques, réduisant ainsi les coûts de remplacement fréquent et favorisant une utilisation durable des ressources.

Optimisation des Coûts: Une évaluation correcte de la fiabilité permet de gérer les coûts liés à la maintenance et aux réparations de manière plus efficace, en évitant des dépenses inutiles.

Conformité aux Normes et Réglementations : Elle aide à garantir que les systèmes électromécaniques respectent les réglementations et les normes de sécurité, ce qui est essentiel pour éviter des sanctions et des problèmes légaux.

Prévision et Prévention des Défaillances : L'évaluation de la fiabilité repose sur des méthodes et des outils qui permettent de prédire les défaillances potentielles, ce qui offre la possibilité de les prévenir.

Amélioration Continue : Elle favorise l'amélioration continue en identifiant les domaines où des améliorations sont nécessaires et en permettant de mettre en place des mesures correctives.

L'évaluation de la fiabilité des systèmes électromécaniques est une démarche fondamentale pour garantir leur performance, leur sécurité et leur durabilité. Elle permet d'optimiser les coûts, de minimiser les risques et de favoriser une utilisation efficace des ressources. Dans un monde où la technologie électromécanique joue un rôle essentiel, l'évaluation de la fiabilité est une composante clé pour assurer le bon fonctionnement des systèmes.

Ces mesures visent à renforcer la sécurité opérationnelle et à améliorer les performances globales de la chaîne de production, tout en contribuant à la préservation des équipements et à la satisfaction des objectifs de l'entreprise.