REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE LARBI TEBESSI DE TEBESSA

INSTITUT DES MINES

DEPARTEMENT D’ELECTROMECANIIQUE

Polycopié de cours

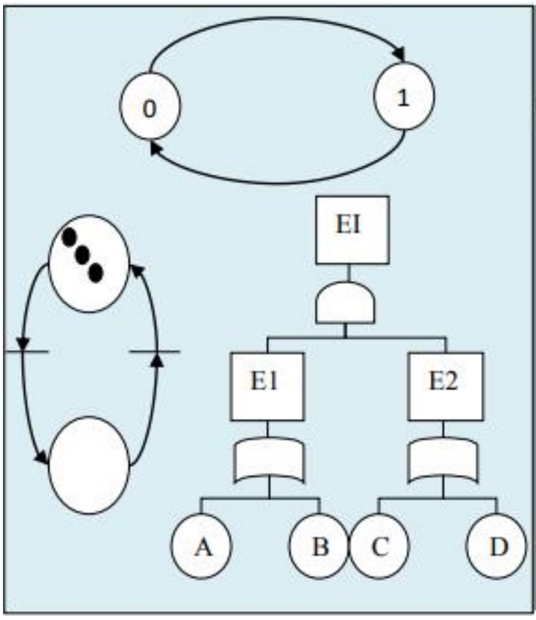
Fiabilité des systèmes

Niveau :3éme année licence

Domaine : Sciences et Technologies

Filières « Electromécanique »

Spécialité : Maintenance Industrielle



Elaboré par :

Dr. Taleb Mounia

MCB à l’Université de Tébessa

Année 2021/2022

PRÉFACE

Ce polycopié de fiabilité, maintenabilité et disponibilité s'adresse aux étudiants de licence Maintenance industrielle. Il est structuré en cinq chapitres présentant une partie théorique, enrichie par des exemples et applications pratiques aux différents concepts de la sureté de fonctionnement (FMD).

La sûreté de fonctionnement n'est pas uniquement un ensemble de concepts mais également une discipline qui regroupe des méthodes permettant d'évaluer les concepts précités de manière qualitative et quantitative.

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.

Dr TALEB Mounia
Département d'électromécanique
Institut des mines
Université de Tébessa

Table des matières

Introduction générale

La sûreté de fonctionnement n'est pas uniquement un ensemble de concepts mais également une discipline qui regroupe des méthodes permettant d'évaluer les concepts précités de manière qualitative et quantitative. Elle est souvent appelée étude FMD (fiabilité, maintenabilité et disponibilité) est une des préoccupations majeures des responsables de l'exploitation de systèmes industriels complexes pour répondre aux exigences opérationnelles et réglementaires.
La fiabilité est souvent définie comme ―la science des défaillances''. Elle est souvent utilisée pour évaluer la durée de vie d'un composant. L'étude de cette fiabilité ne peut se faire qu'en utilisant des méthodes de modélisation.

La disponibilité des systèmes ne peut être assurée qu'à travers, un contrôle du système, une surveillance permanente et une estimation de la fiabilité de l'ensemble des composants du système.

Le calcul de la fiabilité d'un équipement constitue un outil incontournable pour évaluer l'efficacité de n'importe quelle entité. D'autre part le calcul de la fiabilité est une tache compliquée conditionnée par le choix adéquat de la loi de fiabilité. D'où l'intérêt de méthodes, outils et lois précises et plus adaptées pour donner des résultats exactes ou approchées ; raison pour laquelle on peut diviser les méthodes de calcul de fiabilité en méthodes qui donnent des résultats exacts et des méthodes qui donnent des résultats approchés.

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.

Notre cours est divisé en cinq chapitres selon le programme du module fiabilité de la 3éme année licence option maintenance industrielle.

Chapitre I : Fiabilité opérationnelle

I.1 Définition de la fiabilité

La fiabilité est la caractéristique d'un système exprimée par la probabilité qu'il accomplisse la fonction pour laquelle il a été conçu, dans des conditions données et pendant une durée donnée.[1]. La fiabilité est une des composantes de la sûreté de fonctionnement. Elle peut être définie comme : la science des défaillances‖. C'est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ou à satisfaire les besoins des utilisateurs, dans des conditions données, pendant une durée donnée [2], [3].

Elle s'appuie sur les fondements mathématiques, la statistique et le calcul des probabilités. Ces dernières sont nécessaires à la compréhension et à l'analyse des données de fiabilité.
La défaillance c'est-à-dire (la non fiabilité) augmente les coûts d'après-vente.
Construire plus fiable augmente les coûts de conception et de production, en pratique, le coût total d'un produit prend en compte ces deux tendances.

La fiabilité est une fonction décroissante du temps (Figure 1.1), de telle manière que $R(t_1)>R(t_2)$ si $t_1< t_2$

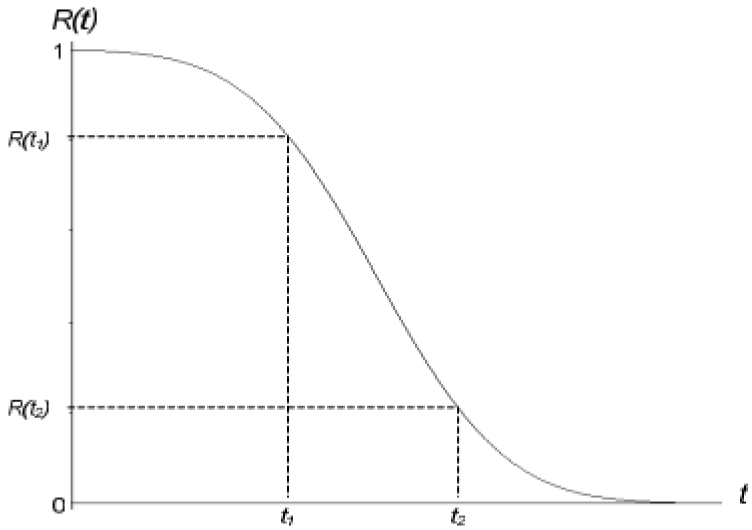


Figure 1.1 la fiabilité décroissante avec le temps [4].

I.2 Fiabilité opérationnelle

Elle résulte de l'observation et de l'analyse du comportement d'un certain nombre de dispositifs identiques, en conditions de fonctionnement réelles. En d'autres termes, il s'agit d'un traitement statistique d'un retour d'expérience. La probabilité moyenne issue de ce retour d'expérience n'a de sens qu'en considérant un nombre important de dispositifs La fiabilité opérationnelle est donc définie par :

$$R(t) = \frac{\text{nombre moyen d'entités non defaillantes à l'instant t}}{\text{nombre total d'entité[o,t]}} \qquad (I.1)$$

I.3 Indicateurs de fiabilité

I.3.1 Taux de défaillance λ

Le taux de défaillance, noté λ(t), est un indicateur de fiabilité qui représente :

- Soit un taux supposé constant de défaillance par unité d'usage exprimé sous la forme générale :

$$\frac{\text{Nombre de defaillances}}{\text{Durée d'usage}} \qquad (I.2)$$

- Soit la fonction λ(t) qui représente une proportion de survivants à l'instant t, tirée d'un échantillon.

Le taux de défaillance s'exprime le plus souvent en pannes par heure [6]

C'est la probabilité (0≤ R≤ 1) ; un produit doit accomplir de manière satisfaisante unefonction requise, sous des conditions données et pendant une période de temps donné.

L'écriture mathématique du taux de défaillance à l'instant t, noté λ(t), défini sur R est la suivante :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \left(\frac{1}{\Delta t} . \frac{R(t) - R(t+\Delta t)}{R(t)} \right) \qquad (I.3)$$

Physiquement le terme λ(t), Δt mesure la probabilité qu'une défaillance d'un dispositif se produise dans l'intervalle de temps [t, +∞] sachant que ce dispositif a bien fonctionné à l'instant Δt.

I.3.2 Temps moyen de bon fonctionnement

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

$$\text{MTBF} = \int_0^{\infty} R(t) \qquad (I.4)$$

Physiquement le MTBF peut être exprimé par le rapport des temps

$$\text{MTBF} = = \frac{\text{Somme des temps de bon fonctionnement entre les n defaillances}}{\text{Nombre d'intervention de maintenance avec immobilisation}} \qquad (I.5)$$

Si λ est constant : MTBF = $\frac{1}{\lambda}$ (I..6)

Par définition le MTBF est la durée de vie moyenne du système [7]

I.4 Les différentes phases du cycle de vie d'un produit

Liée au problème de défaillances, la vie des équipements se présente en trois phases :

Phase de jeunesse : λ(t) décroît rapidement c'est la période de mise en service et de rodage de l'installation. Les défaillances sont dues à des anomalies ou imperfections de montage.

Phase de maturité : λ(t) est pratiquement constant est la période de vie utile ou la défaillance est aléatoire. Le taux de défaillance est constant ou légèrement croissant, correspondant au rendement optimale l'équipement.

Phase de vieillesse : λ(t) croit rapidement. C'est la période d'obsolescence, à dégradation accélérée Souvent, on trouve une usure mécanique de la fatigue, une érosion ou une corrosion. A un certain point de λ(t), le matériel est mort.

Le graphe représentant la variation du taux de défaillance, appelé « courbe en baignoire », possède trois allures différentes selon le matériel mécanique, matériel électrique ou matériel électronique (figure 1.2) [8]

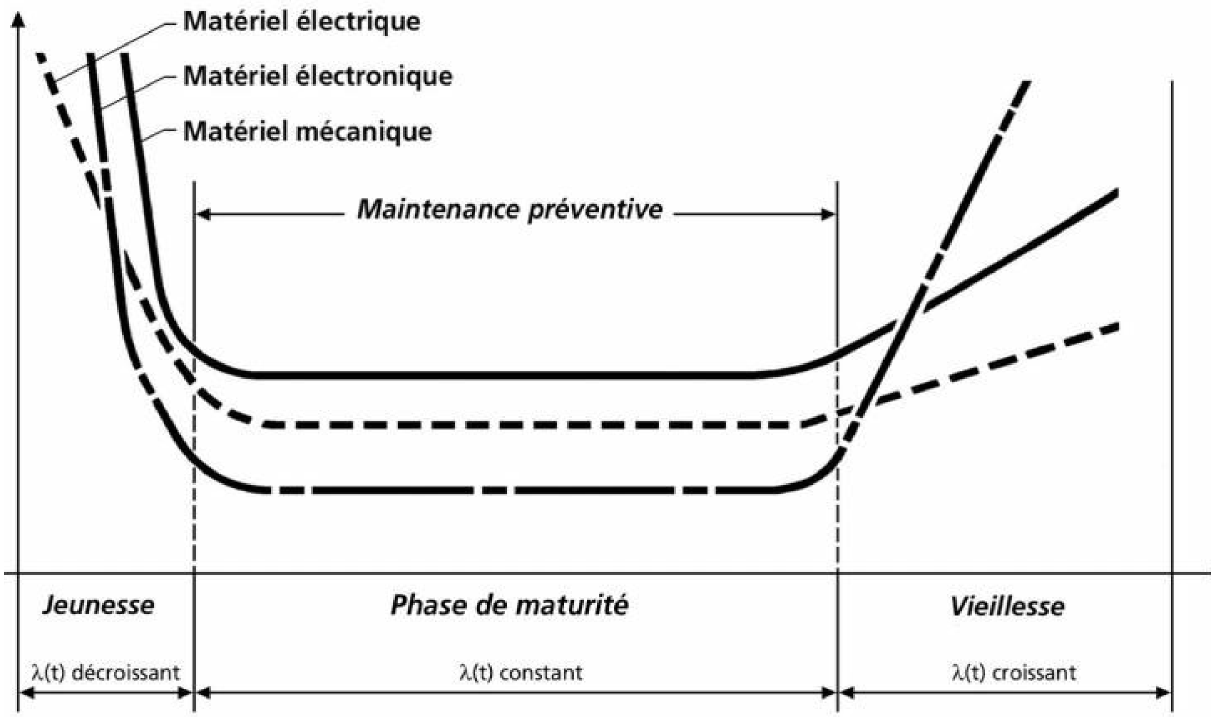


Figure 1.2 : Courbe en baignoire : taux de défaillance [8]

Les courbes du taux de défaillances figure1.2 ont une même forme générale mais présentent néanmoins des différences suivant la technologie du système étudié :

A- Electrique

B- Electronique

C- Mécanique

I.5 Evolution des couts en fonction de la fiabilité

La non fiabilité augmente les couts d'après-vente (garanties, frais judiciaires). Construire plus fiable, augmente les couts de conception et de production. Le cout total prend en compte ces deux contraintes [7].

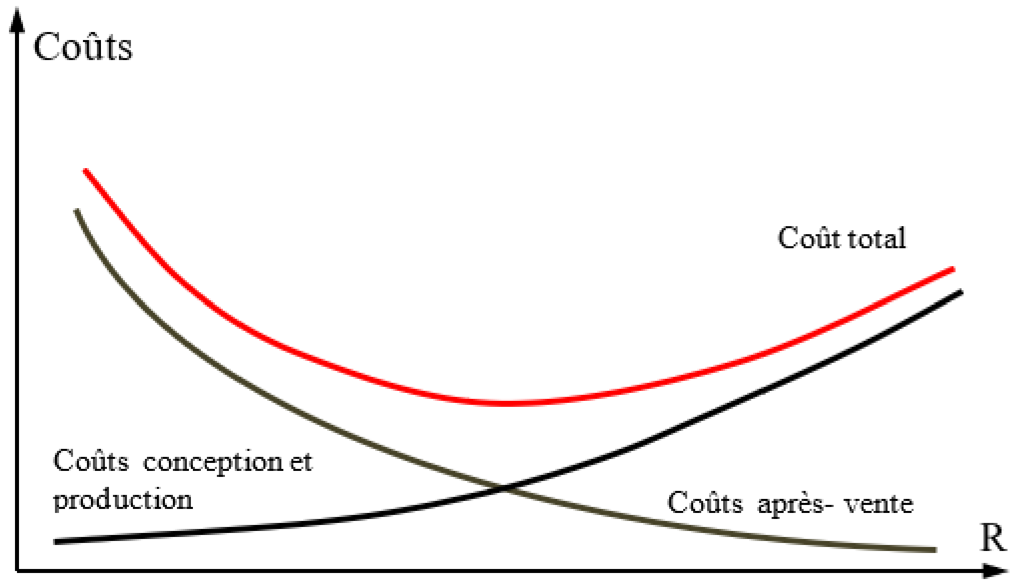


Figure 1.3 : Courbes d'évolution des coûts en fonction de la fiabilité [7]

La fiabilité d'une machine à tendance à diminuer avec le nombre de ses composants ou de leurs complexités. La maîtrise de la fiabilité devient donc plus délicate.

Chapitre II : Méthodes d'évaluation de la fiabilité

II.1 Introduction

Les systèmes complexes nécessitent des entités fiables. L'intégration de ces entités est un problème complexe qui demande un très haut niveau de vérification des propriétés structurelles, fonctionnelles, non-fonctionnelles ainsi que l'interactivité de ses composants et entités, ce qui est important quand on cherche notamment la fiabilité de ce système complexe.

II.2 Evaluation de la fiabilité

Il existe plusieurs techniques pour évaluer la fiabilité de systèmes, les techniques les plus utilisées sont :

II.2 .1 Arbre de défaillance

L'arbre de défaillance est une représentation graphique. Il est construit en recherchant l'ensemble des événements élémentaires ou les combinaisons d'événements, qui conduisent à un événement Redouté (ER). L'objectif est de suivre une logique déductive en partant d'un Evénement Redouté pour déterminer de manière exhaustive l'ensemble de ses causes jusqu'aux plus élémentaires.

Exemple

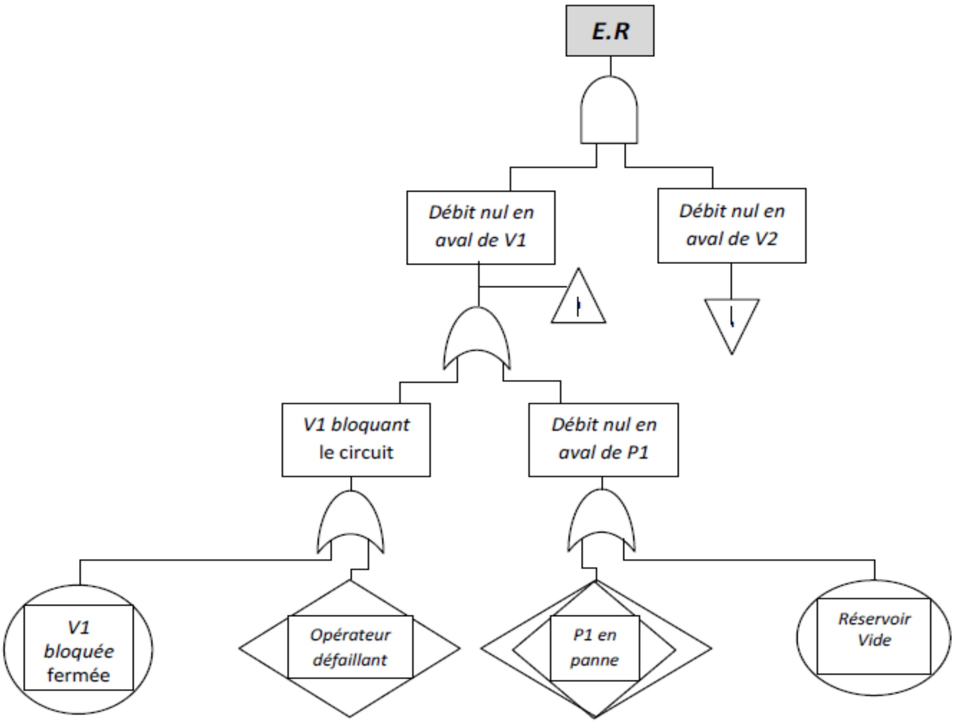


Figure 2.1 Exemple d'un arbre de défaillance [12]

II.2 .2 Bloc-diagramme de Fiabilité (BDF)

Un BDF est un graphe orienté (N, E), dont chaque sommet de N est un bloc représentant un composant du système et chaque arc de E est un lien de causalité (dépendance) entre deux blocs. Dans tout BDF, deux blocs particuliers sont identifiés : ceux sont sa source S et sa destination D. Un BDF représente un système et il est utilisé pour calculer la fiabilité : un BDF est opérationnel S'il existe au moins un chemin opérationnel de S à D. La probabilité qu'un bloc soit opérationnel est sa fiabilité.
Quand le BDF est construit, on distingue trois types de système : série, parallèle ou série parallèle (Mixte) [12].

II.3 Les lois de fiabilité

Selon la définition de la commission électrotechnique internationale (CEI 50191), la fiabilité est la « caractéristique d'un dispositif exprimée par la probabilité qu'il accomplisse une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée ». D'un point de vue probabiliste, la fiabilité est la probabilité qu'un système soit non défaillant de manière continue pendant l'intervalle de temps [0, t].

II.3.1 Notions de variable aléatoire, densité de probabilité et fonction de répartition

II.3.1.1 Variable aléatoire

On appelle variable X**,** une variable aléatoire telle qu'à chacune des valeurs de X on peut associer une probabilité F(x).

Une variable aléatoire peut être continue ou discrète

Variable continue : Peut prendre n'importe quelle valeur réelle (ensemble des nombres réels) appartenant à un intervalle donné.

Variable discrète (Discontinue) : Peut prendre n'importe quelle valeur entière (ensemble des nombres naturels).

II.3.1.2 Densité de probabilité f(t)

Soit une loi de probabilité relative à une variable aléatoire continue t. Elle est caractérisée par la fonction de densité f(t) (densité de probabilité). Cette fonction peut être obtenue à partir de données de durées de vie du système observées depuis le début de son exploitation [13]. La fonction de densité f(t) a les propriétés suivantes :

- ✓ $f(t) > 0$
- ✓ $\int_0^\infty f(t).dt = 1$
- ✓ $f(t).dt$ exprime la probabilité que le système tombe en panne entre *t* et *t+dt :*

$$f(t).dt = \text{Prob } \{t < \text{durée de vie} < t+dt\}$$

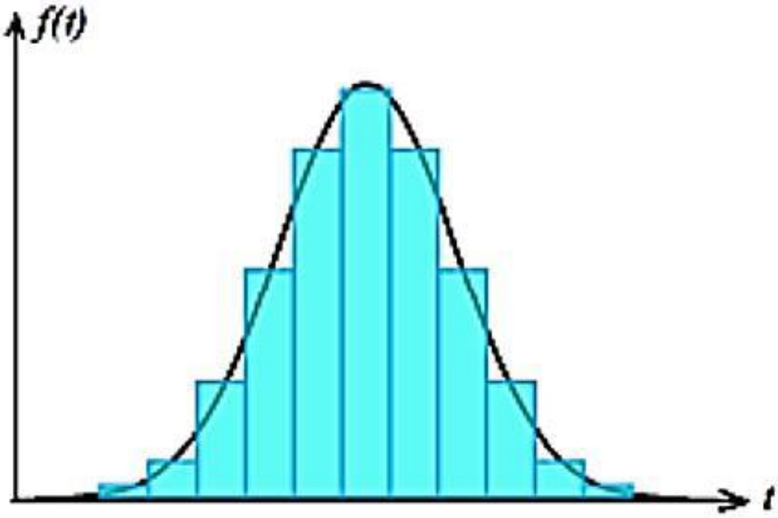


Figure 2.2 Densité de probabilité [13].

II.3.1.3 Fonction de répartition (de défaillance) F(t)

Soit *F(t)* la fonction de distribution (répartition) associée à la variable aléatoire t :

$$F(t) = \int_0^\infty f(t).\,dt \qquad \text{(II.1)}$$

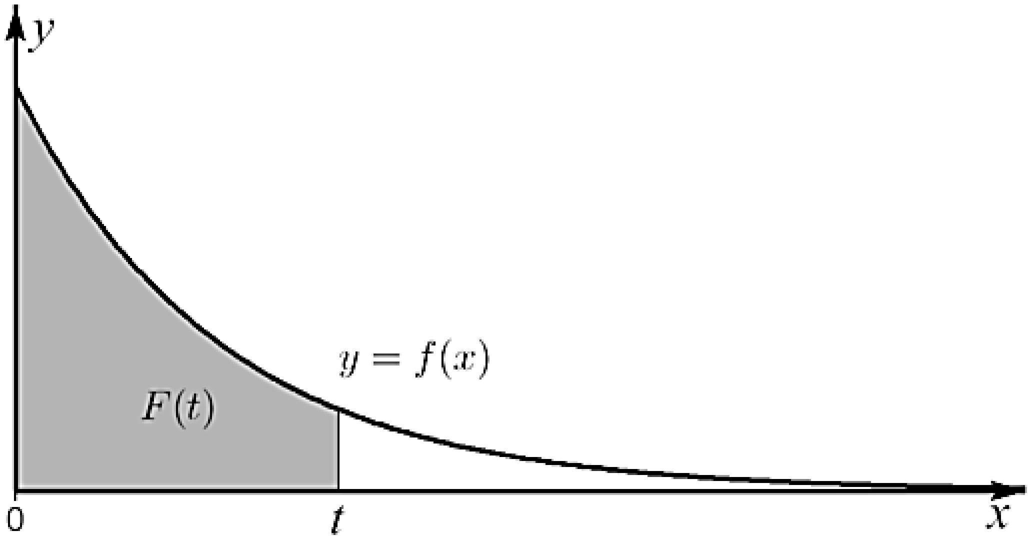


Figure 2.3 Fonction de défaillance [7]

F(t) représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard ait une défaillance avant l'instant t : F(t) = Prob {0 < durée de vie < t)

Propriétés de la Fonction de répartition

- ✓ F(t) ∈ [0 ,1] pour tout t ∈ R
- ✓ F est une fonction croissante

- ✓ $\lim_{t \to -\infty} F(t)$=0 et $\lim_{t \to +\infty} F(t) = 1$
- ✓ Pour tout a < b dans R. F(b) – F(a) = Prob [a ≤ t ≤ b] = $\int_a^b f(t).dt$

La probabilité P(a ≤ X ≤ b) correspond à l'aire du domaine situé sous le graphe de *f* entre les abscisses a et b.

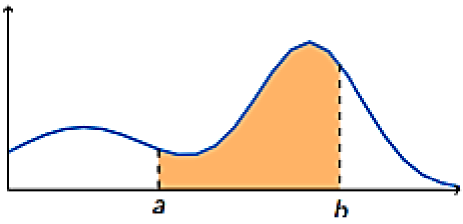


Figure 2.4 probabilité P (a ≤ X ≤ b) [5]

II.3.1.4 Fonction de fiabilité

Soit *R(t)* la fonction de fiabilité du système

R(t) exprime la probabilité que le système survive jusqu'à l'instant t.

R(t)= Prob {durée de vie ≥ t}

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x).dx = 1- F(t) \qquad (II.2)$$

La fonction de défaillance nous amène naturellement une fonction associée : la fonction de fiabilité *R* définie pour tout *t* ≥0 par : R(t)= 1-F(t). Le nombre R(t) représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard dans la population n'ait pas de défaillance avant l'instant *t*. La figure 3.5 montre les deux fonctions associées (défaillance et fiabilité) [7].

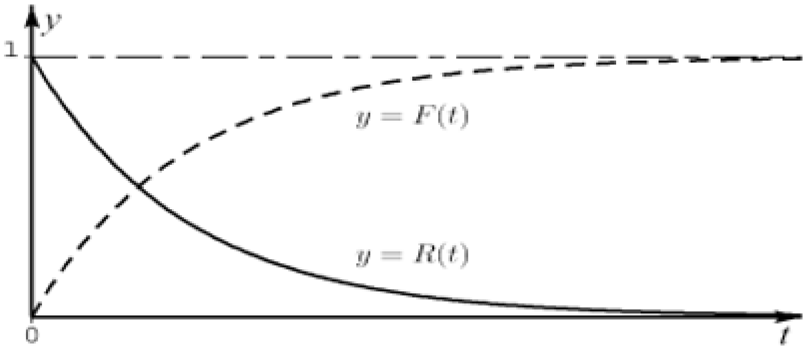


Figure 2.5 Fonction associée

Un dispositif mis en marche pour la première fois à (to) tombera en panne à un instant non connu à priori "t" : date de la panne est une variable aléatoire de la fonction de répartition "$F(t)$». Voir figure 2.6.

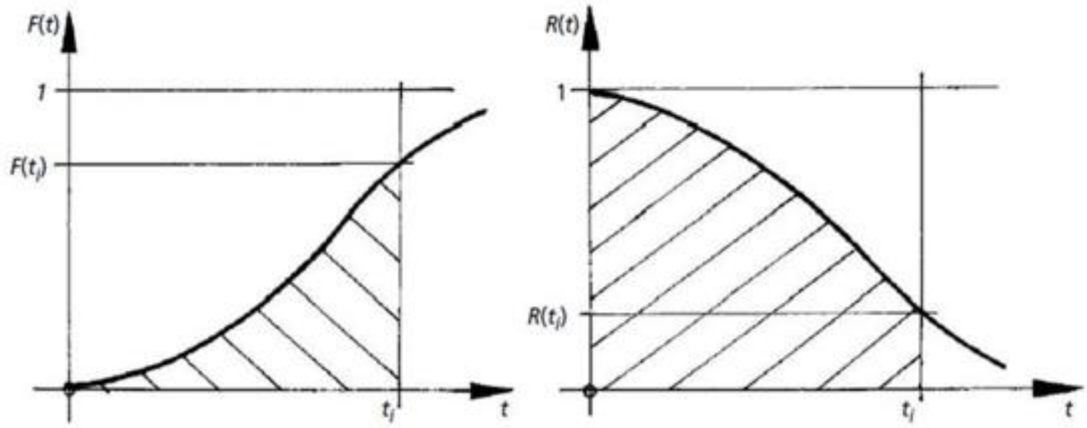


Figure2. 6. Probabilités complémentaires [17]

II.3.2 Analyse de fiabilité à partir des lois de probabilités

II.3.2.1 Lois de probabilité continues

Le tableau 2.1 résume quelques lois de probabilités continues :

Tableau 2.1 : Exemples de lois continues [7]

Loi et Symbole	**Densité**
Loi Uniforme ***U[a,b]***	$f_X(x) = \frac{1}{b-a}$
loi normale ***N(μ, σ²)***	$f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$
Loi exponntielle ***Exp(λ)***	$f_X(x) = \lambda e^{-\lambda x}$
loi de Weibull ***W(η,β)***	$f_X(x) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}$

D'autres lois de probabilité continue peuvent être rajoutées telles que la loi du Khi deux, la loi Gamma, la loi logistique, la loi de Cauch, la loi Bêta, la loi de Fisher …

II.3.2.2 Lois de probabilité discrètes

Une loi est dite discrète si elle prend ses valeurs dans **N** c'est à dire des valeurs entières comme par exemple celle qui compte le nombre de pannes.

Quelques lois discrètes sont présentées dans le tableau 2.2

Tableau 2.2 : Exemples de lois discrètes [1],[7]

Loi de X	Fonction de probabilité de X
Bernouli ***B(p)***	$P_r(X = k) = p^k(1-p)^{1-k}$
Binomiale ***B(n,p)***	$P(k) = P(X = k) = C_k^n p^k (1-p)^{n-k}$
Géométrique ***G(p)***	$P_r(X = k) = p^k(1-p)^{1-k}$
Poisson ***P(λ)***	$p(k) = P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$

En raison de la complexité des lois citées précédemment, nous nous étudierons que celles qui sont largement employées dans le calcul de la fiabilité des systèmes.

II.3.2.2.1 loi binomiale

Si une défaillance a une probabilité (*P*) de survenir, la probabilité de la voir apparaître *k* fois en (*n*) essais est [14] :

$$P(k) = P(X=k) = c_k^n P^k (1-P)^{n-k} \qquad \text{(II.3)}$$

P (X= k) : Probabilité pour que la défaillance se produise (*k*) fois

P : Probabilité pour que la défaillance se produise au cours d'un seul essai.

c_k^n : Nombre de combinaisons de (*k*) défaillances pris parmi (*n*) essais.

Remarques :

1. Un dispositif a une probabilité (*P*) d'être défaillant donc (1-*P*) d'être au bon fonctionnement.
2. Nous sommes en présence d'une loi discrète puisque la variable aléatoire (*k*) ne peut prendre que des valeurs entières.
3. L'espérance mathématique est = n**p*
4. La variance V(x)= n.p.(1-*p*)
5. L'écart type : $\sqrt{n \cdot P}(1-P)$

Exercice

Huit composants électroniques identiques et indépendants sont mis en service simultanément. La probabilité pour qu'un composant soit encore en fonctionnement au bout d'un an est de 0.7.

Quelle est la probabilité pour qu'au bout d'un an il y ait encore quatre composants en fonctionnement ? au moins quatre ?

Solution :
Soit la variable aléatoire X :
X : nombre de composants électroniques encore en service au bout d'un an.
X suit une loi binomiale B (8 ;0.7)

1) On demande P(X=4) = c_4^8 0 .7^{8-4} = 0,136
2) On demande P(X≥4) =1- [P(X=0) +P(X=1) +P(X=2) +P(X=3)]
   = 1- [$0,3^8$+c_1^8 .0,7.$0,3^7$+c_2^8 .$0,7^2$.$0,3^6$+c_3^8.$0,7^3$.$0,3^5$] =0,942

II.3.2.2 .2 loi exponentielle

La loi exponentielle n'est qu'un cas particulier de la loi de Weibull, on l'applique généralement pour un taux de défaillance constant, ce qui correspond à la phase sans usure ni vieillissement. C'est à dire à la phase de maturité ou de bon fonctionnement. C'est l'une des lois les plus appliquées pour différentes disciplines.

Une variable aléatoire *T* suit une loi exponentielle de paramètre t si sa densité de probabilité f(t) est donnée par :

$$f(t)= \lambda e^{- \ t} \qquad \text{(II.4)}$$

La distribution exponentielle s'exprime ainsi :

$$\text{Fiabilité : } (t) = e^{-\lambda \ t} \qquad \text{(II.5) :}$$

Avec les paramètres de significations :

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

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

La fonction de répartition : $(t) = 1 - e^{- \ t} = \int^{t} \lambda e^{- \ t} \, dt$ (II.6)

La moyenne des temps de fonctionnement (MTTF) ou de bon fonctionnement (MTBF) un important estimateur de la fiabilité et de la disponibilité des systèmes (voir figure 2.7)

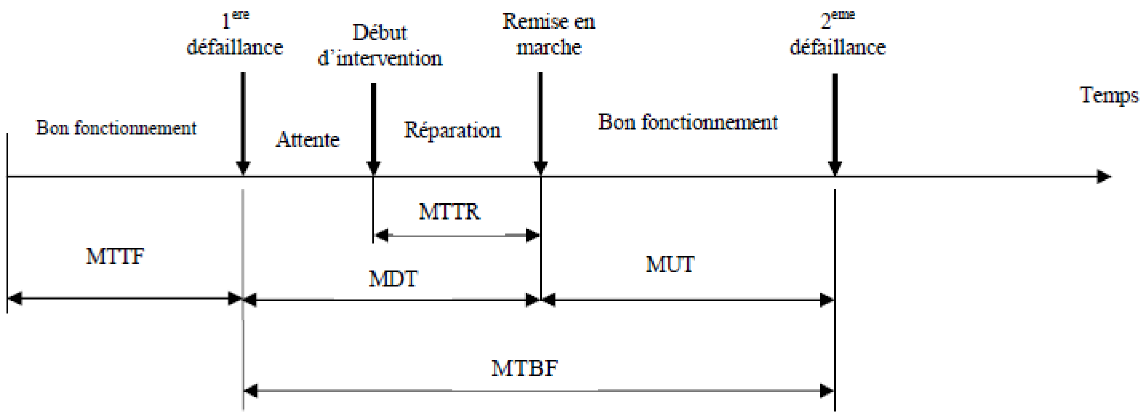


Figure 2.7 les temps de maintenance [14]

MTTF=Mean Time To First Failure=Fonctionnement avant 1ère défaillance
MDT=Mean Down Time =Temps Moyen d'Indisponibilité
MUT=Mean up Time=Temps Moyen de Remise en Etat
MTBF=Mean Time Between Failure=Temps Moyen entre Défaillance
MTBF-MTTR=Fonctionnement Moyen Entre Défaillance.

Le MTTF se calcule par l'expression :

$$MTTF = \int_0^{\infty} (t)\, dt = \int_0^{\infty} e^{-\ t}\, dt = 1 \qquad \text{(II.7)}$$

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

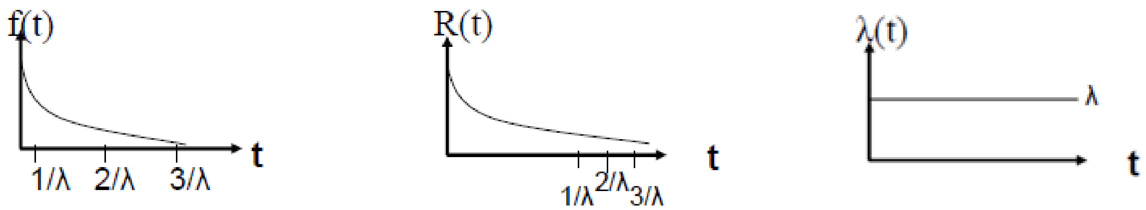


Figure 2.8 Distribution des fonctions de la loi exponentielle [7]

La loi exponentielle a de nombreuses applications dans le domaine de l'ingénierie en particulier dans l'étude de fiabilité d'un équipement.
La courbe théorique de distribution de la loi exponentielle est donnée à la figure 2.9

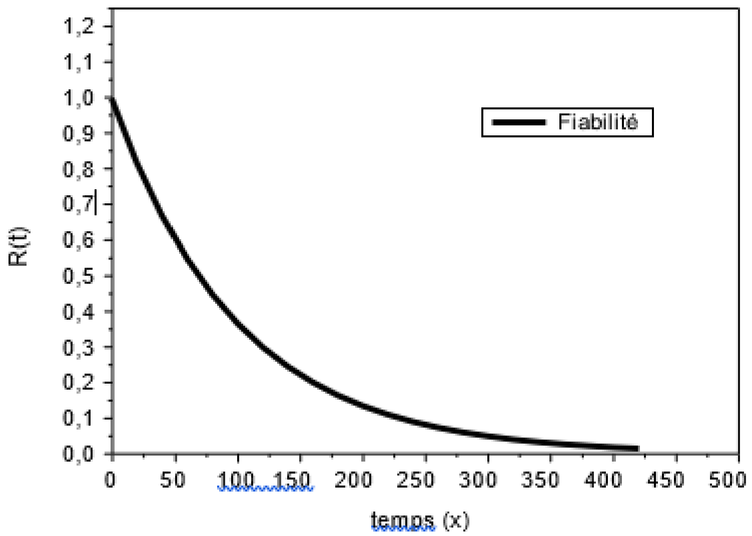


Figure 2.9. Courbe théorique de fiabilité de la loi exponentielle [7]

N.B

Notons que les variables aléatoires décrivant une durée de vie sans usure suivent toutes une loi exponentielle.

Exercice [15]

Sur un système on a observé 05 pannes pour une durée d'observation de 900 heures. Quel est la MTBF de ce système en supposant que le taux de défaillance suit le modèle exponentiel ?
Exercice 2

Un matériel électronique a une durée de vie moyenne de 3200 heures. On a tout lieu de penser que sa fiabilité suit une loi exponentielle.
- Déterminer sa fonction de fiabilité.

- Quelle est la probabilité pour qu'il fonctionne encore au bout de 2000 heures ? au bout de 4000 heures ?

II.3.2.2.3 loi de Weibull

Contrairement au modèle exponentiel, la loi de Weibull couvre le cas où le taux de défaillance est variable et permet de s'ajuster aux périodes de jeunesse et de vieillesse. L'expression de la fiabilité devient :

$$R(t) = e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta}} \qquad \text{(II.8)}$$

Avec ses trois paramètres :

β, paramètre de forme (β > 0)
η, paramètre d'échelle (η > 0)
γ, paramètre de position (– ∞ < γ < + ∞).

Sa courbe théorique de distribution est donnée à la figure 3.9

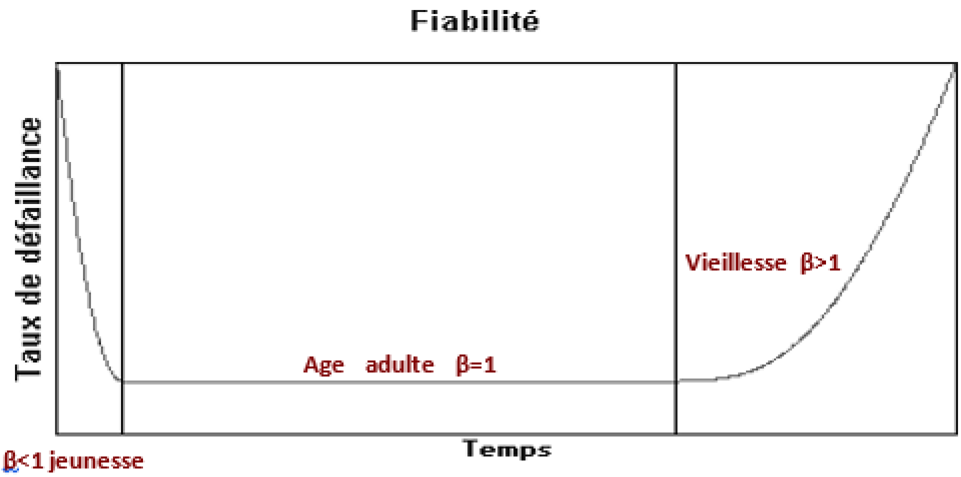


Figure 2.10 Courbe en baignoire

Outre son adaptabilité à toutes les situations, le modèle de Weibull livre d'autres informations en plus de niveau de fiabilité d'un dispositif à un instant t. Il Permet une analyse plus fine et donc une image plus précise de l'état du système.

Paramètre de forme (β)

Le paramètre β fournit des indications à la fois qualitatives et quantitatives du taux de défaillance instantané. Il est dit indicateur de forme de la courbe de densité de probabilité.

- Si sa valeur est $<$ 1, alors $\lambda(t)$ est décroisant, indiquant que le système est en période de jeunesse.
- Maintenant, si β est égal ou très voisin de 1, c'est le signe d'un comportement régulier du système avec un taux de défaillance sensiblement constant. C'est donc la période
- Enfin si la valeur du paramètre de forme β est supérieure à 1, alors le modèle de Weibull est encore plus instructif. Dans ce cas, β révèle d'abord une phase d'obsolescence et c'est l'expression quantitative qui retiendra d'avantage l'attention, car il est possible de lier la valeur au degré d'obsolescence du matériel.

Paramètre d'échelle (η)

Caractérisant le choix d'une échelle. Il s'exprime dans la même unité de temps (heures, cycles…) que le temps de bon fonctionnement (TBF).Ce paramètre est toujours positif.

Paramètre de localisation (y)

Egalement nommé paramètre de décalage ou de position, il s'exprime en unité de temps, il indique la date d'apparition du mode de défaillance.

- ✓ Si y>0, il y'a une survie totale a t=0 et t=y.
- ✓ Si y=0, les défaillances débutent à l'origine de temps.

✓ Si y<0, les défaillances ont débuté avant l'origine des temps relevés.

- La densité de probabilité $f(t)$: C'est la probabilité d'avoir une seule avarie au temps (t). Elle est donnée par la formule :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta}\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta-1} e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta}} \qquad \text{(II.9)}$$

- La fonction de répartition $F(t)$ Elle est donnée par la formule :

$$f(t) = 1 - e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta}} \qquad \text{(II.10)}$$

- La fiabilité correspondante est R(t) : C'est la probabilité de non défaillance dans l'intervalle du temps (0, t) elle donnée par la formule :

$$R(t) = e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta}} \qquad \text{(II.11)}$$

- Le taux d'varie (le taux de défaillance) correspondant $\lambda(t)$ parfois noté $z(t)$, c'est la probabilité d'avarie au temps $(t + \Delta t)$, il est exprimée par la formule :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta}\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta-1} \qquad \text{(II.12)}$$

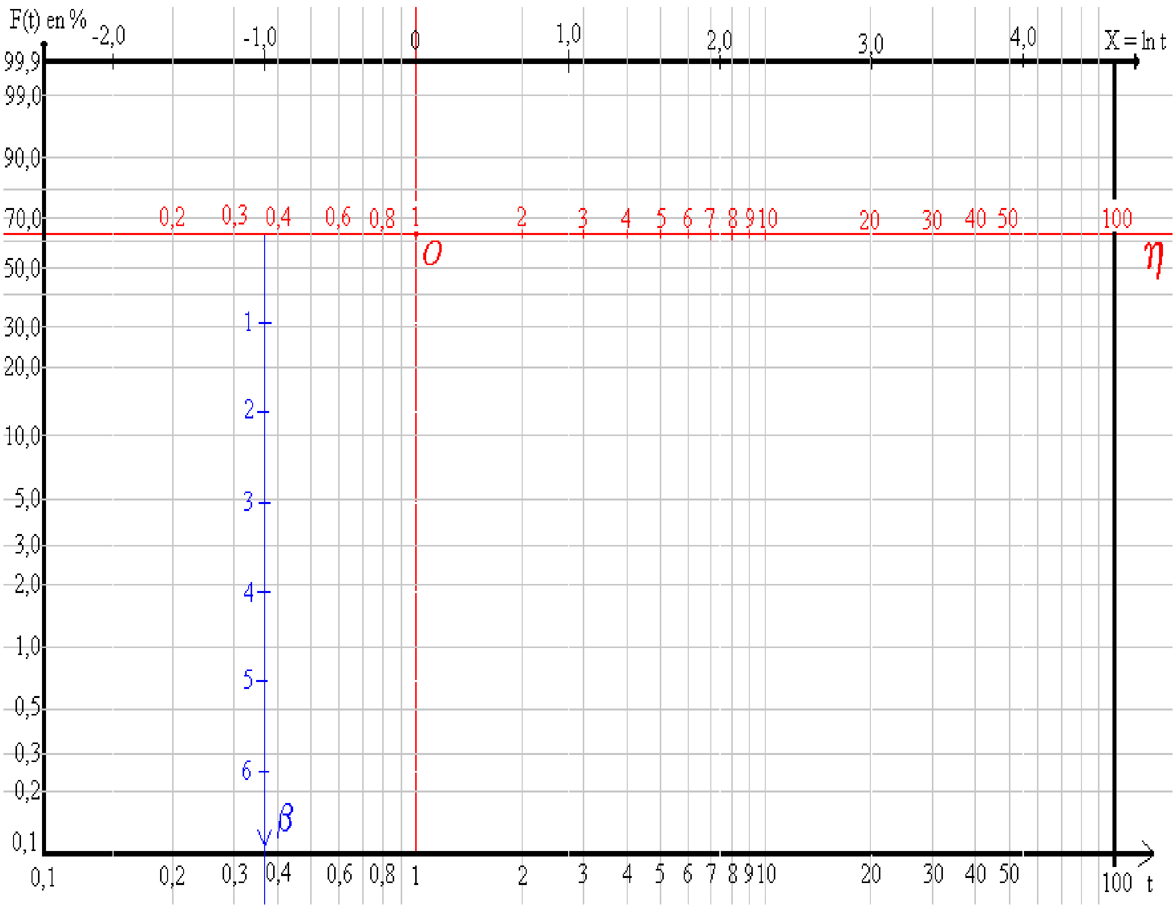


Figure 2.11 Papier de Weibull [7]

Exemple

Nous appliquons le modèle de Weibull sur le four rotatif de la cimenterie d'Elmalabiod

A chaque instant (t) de TBF nous déterminons la fiabilité $R(t)$, la fonction de défaillance ou répartition $F(t)$, la densité de probabilité$f(t)$, et le taux de défaillance $\lambda(t)$.
Pour le rang 1 nous obtenons les résultats suivants :

1) La fiabilité R(t) :

$$R(t) = e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta}} = e^{-\left[\frac{155.49-0}{1020}\right]^{1.5}} = 0{,}9422 = 94.2\%$$

2) La fonction de réparation F(t) :

$$F(t) = 1 - e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta}} = 1 - R\quad(t) = 0{,}0578 \approx 6\%$$

3) La densité de probabilité f(t) :

$$F(t) = \frac{\beta}{\eta}\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta-1}.e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta}} = \frac{1.5}{1020}\left[\frac{155.49-0}{1020}\right]^{1.5-1}.R(t)$$

$$f_1(t) = 0.00053694$$

4) Le taux de défaillance λ(t) :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta}\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta-1} = \frac{1.5}{1020}\left[\frac{155.49-0}{1020}\right]^{1.5-1} = 0{,}00057$$

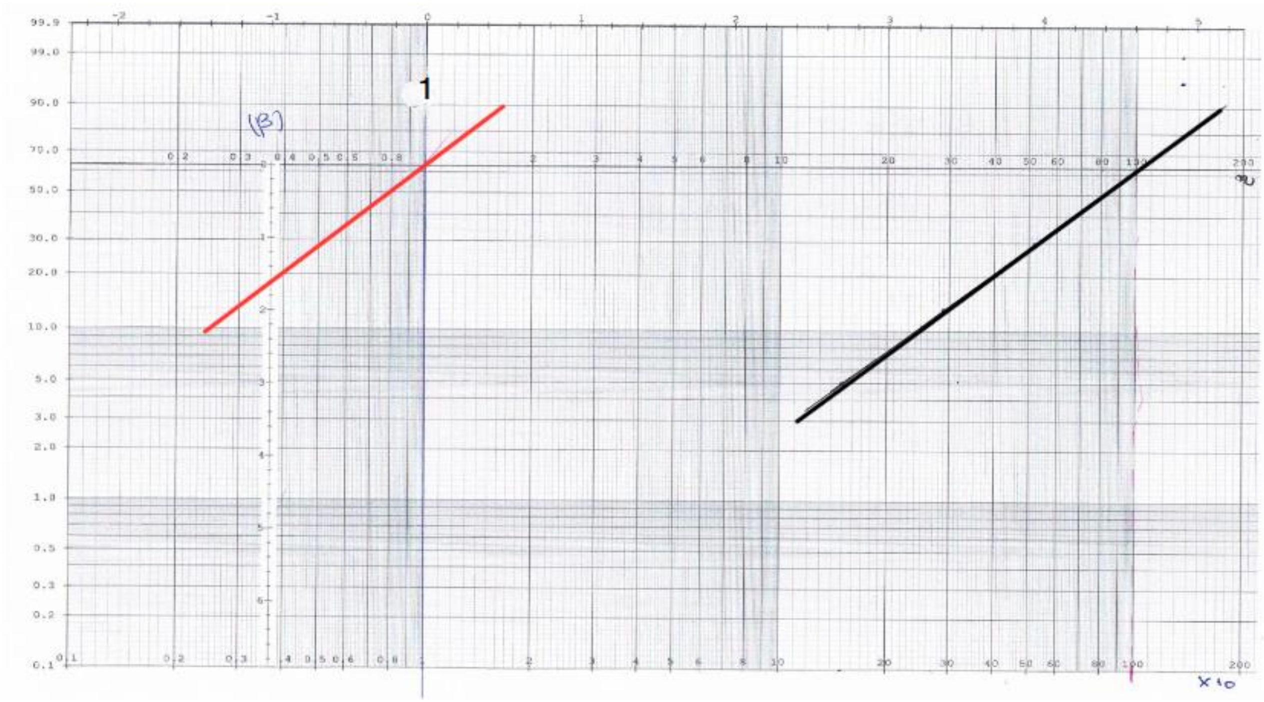
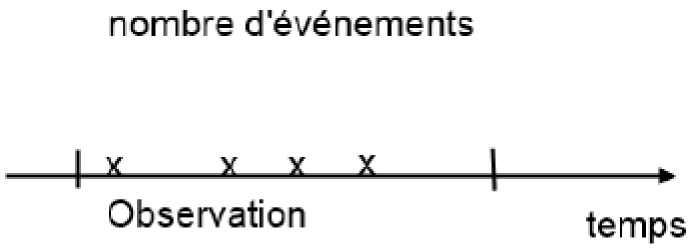


Figure 2.12 paramètres de la loi de Weibull (cas du four de la cimenterie d'Elmalabiod)

II.3.2.2.4 Loi de poisson

La loi de Poisson ou modèle de Poisson permet la modélisation de l'observation d'un phénomène qui produit des événements à un rythme connu. On s'intéresse à l'observation d'événements et on suppose

1. un seul événement arrive à la fois
2. le nombre d'événements se produisant ne dépend que du temps de l'observation
3. les événements sont indépendants.[16]



Considérons X la v.a. qui donne le nombre d'événements observés dans une unité de temps. On a alors un phénomène de Poisson et la variable aléatoire qui donne le nombre d'événements par unité de temps suit une loi de Poisson, notée $X \sim P(\lambda)$, où λ est le nombre moyen d'événements par unité de temps.

Les valeurs possibles de la variable aléatoire sont $SX = \{0, 1, 2, \ldots\}$ et la loi de probabilité est donnée par :

$$f_X(x) = \frac{e{-}\lambda\,.\lambda^{x}}{x!} \quad \text{pour} = 0,1,2 \ldots \quad \text{(III.13)}$$

Où e est la fonction exponentielle au point 1 : e ≃2,71828. Les principales caractéristiques numériques sont :

Moyenne : $E(X) = \lambda$
Variance : $V ar(X) = \lambda$
Ecart type : $\sqrt{\lambda}$

Voici la représentation graphique de la distribution de Poisson pour quelques valeurs de λ

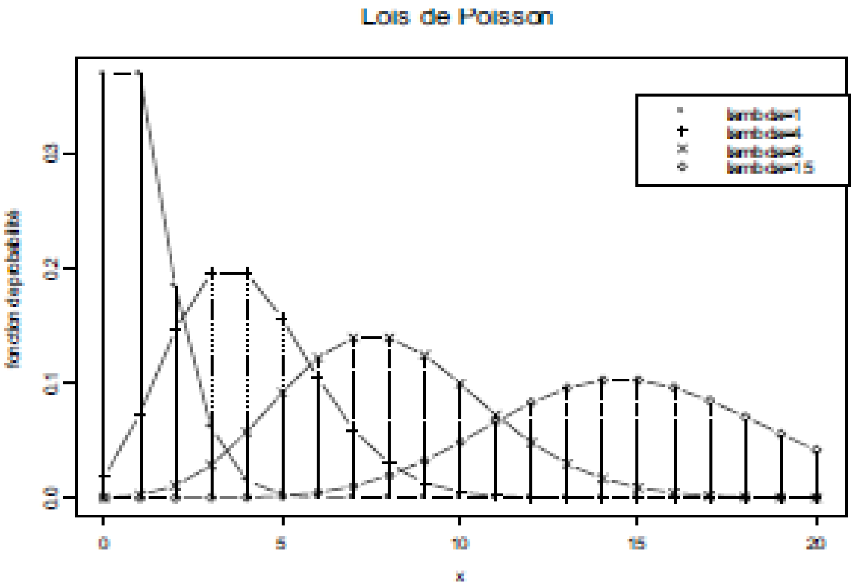


Figure 2.13 Distribution de Poisson [16]

Exemple : Une composante électronique produit en moyenne 1 erreur par 100000hres. Quelle est la probabilité d'une erreur si la pièce fonctionne 20 000 hres ?

Solution :

Posons X la v.a. qui donne le nombre d'erreurs sur 20 000 heures de fonctionnement
$X \sim P(\lambda)$ ou λ est le nombre moyen d'erreurs en 20 000hres,

$$\lambda = \frac{1}{100000} 20000 = \frac{1}{5}$$

On cherche $P_r(x \geq 1)$ puisqu'on veut en réalité la probabilité d'une erreur ou plus

Or $P_r(x \geq 1) = 1 - P_r(x=0)$

$$= 1 - \frac{e^{-1/5}(1/5)^0}{0!} = .181\,27$$

III. 1 Fiabilité des systèmes

Un système est constitué des composants élémentaires, sa fiabilité dépend à la fois de fiabilité de ces composants et de la façon dont le bon fonctionnement ou la panne de chaque composant influe sur le bon fonctionnement ou la panne du système. Donc l'objet de cette section est la détermination de la fiabilité d'un système à partir de la fiabilité de ses composants [9].

III.1.1 Fiabilité de système constitué de plusieurs composants

III.1.1.1Système en série

R(s) représente la fiabilité d'un ensemble de "n" composants montés en série.
La fiabilité R(s) d'un ensemble de "n" composants A, B, C, …, n montés ou connectés en série est égale au produit des fiabilités respectives R_A, R_B, R_C, …, R_n de chacun des composants.

On dit qu'un système est en série si la défaillance d'un seul composant entraine la défaillance du système (c'est-à-dire que le système ne fonctionne que si tous ses composants fonctionnent).

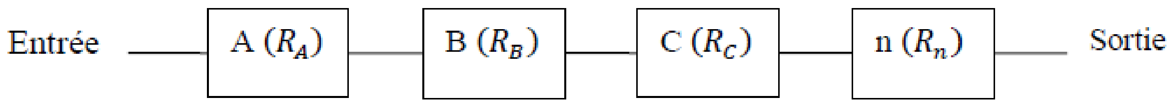


Figure 3.1 Système en série

La fiabilité du système est donnée par La formule suivante :

$$R(s) = RA \times RB \times RC \times \ldots Rn \qquad \text{(III.1)}$$

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

$$R_S = e^{-\lambda At} \times e^{-\lambda Bt} \times e^{-\lambda Ct} \times \ldots .. e^{-\lambda nt} \qquad \text{(III.2)}$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda_A+\lambda_B+\lambda_C+\cdots+\lambda_n} \qquad \text{(III.3)}$$

Si en plus, les composants sont identiques : $\lambda_A = \lambda_B = \lambda_C = \cdots = \lambda_n$ Alors :

$$R_s = e^{-n\lambda t} \text{ et } MTBF = \frac{1}{n\lambda} \qquad \text{(III.4)}$$

III.1.1.2 Système en parallèle

Un dispositif, constitué de "n" composants en parallèle, ne tombe en panne que si les "n" composants tombent en panne au même moment.
Soit les "n" composants de la figure ci-dessous montés en parallèle. Si la probabilité de panne pour chaque composant repéré (i) est notée Fi, alors :

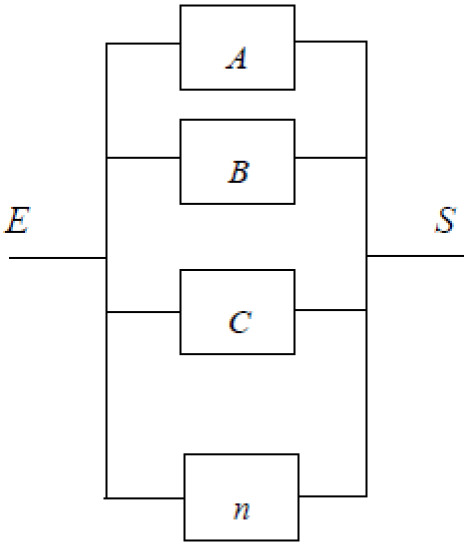


Figure 3.2 Système en parallèle

La fiabilité du système est donnée par l'équation suivante :

$$R_p = 1 - (1 - R_A) \times (1 - R_B) \times (1 -) \times \ldots . \times (1 - R_n) \qquad \text{(II.5)}$$

La composition en parallèle est meilleure par rapport à celle en série, ceci s'explique par l'augmentation de la fiabilité pour ce type de composition D'ailleurs on utilise cette propriété pour accroitre la sécurité de fonctionnement d'un système. Prenons l'exemple du système de freins d'urgence sur une automobile ou celui de deux pompes en parallèle.

III.1.1.3 Système combiné

C'est la combinaison des deux compositions précédentes.

Exercice 1

Soit un poste de radio constitué de quatre composants connectés en série, une alimentation R_A=0.95, une partie récepteur R_B=0.92 ; un amplificateur R_C=0.97 et hautparleur R_D= 0.89 ; déterminer la fiabilité R_S de l'appareil.

Solution

R_S= R_A. R_B .R_C. R_D=0.95x 0.92x0.97x0.89=0.7545 (soit une fiabilité de 75% environ)

Exercice 2

Soit une imprimante constituée de 2000 composants montés en série supposés tous de même fiabilité, très élevée R= 0.9999, Déterminer la fiabilité de l'appareil.

Solution

R(s)= $R^n = 0.9999^{2000} = 0.8187$ (soit une fiabilité de 82 %
environ Si on divise par deux le nombre des composants
R(s)= $R^n = 0.9999^{1000} = 0.9048$ (environ 90.5%)

Si on souhaite avoir une fiabilité de 90 % pour l'ensemble des 2000 composants montés en série, déterminons la fiabilité que doit avoir chaque composant
RS= $0.9000 = R^{2000}$
Expression que l'on peut écrire, à partir des logarithmes népériens sous la forme
$\mathrm{Ln}R_S = \mathrm{Ln}0.9 = 2000.\,\mathrm{Ln}R$ D'où R=0.999945

Exercice 3 :

Considérant une machine automatisée fonctionnant pendant un cycle opératoire de 155 heures. Pendant cette période le système subit 5 défaillances à des moments différents, suivies d'une réparation puis d'une remise en activité. Les durées respectives des défaillances sont : 2,5h ; 8,3h ; 3,7 ; 1,8 et 7,5 h

Solution

$$\lambda = \frac{5}{155-(2,5+8,3+3,7+1,8+7,5)!} = 0.0381$$

II.1.1.4 La loi de survie

La fiabilité ou la probabilité de survie est donnée comme suit :

$$R(t)= \frac{N(t)}{N(0)} \qquad \text{(III.6)}$$

Avec
N(t) : le nombre de survivants à la fin de la période t.
N (0) : le nombre de matériels mis en service.

Le taux de défaillance est donné par :

$$\lambda(t)= \frac{N(t-1)-N(t)}{N(t-1)} \qquad \text{(III.7)}$$

Le facteur de fiabilité MTBF est :

$$\text{MTBF}= \sum_{T=1}^{\infty} \frac{N(t)}{N(0)} = \sum_{t=1}^{\infty} R(t) \qquad \text{(III.8)}$$

Exemple :
Soit 20 composants identiques mis en service à t = 0, N (0) = 20
Tableau 3.1 Exemple d'application [11]

Période t	Survivants N(t)	Probabilité de survie R(t)	Taux de défaillance Z(t)
0	20	1	-
1	17	0.85	0.15
2	15	0.75	0.12
3	13	0.65	0.13
4	10	0.5	0.23
5	08	0.4	0.20
6	05	0.25	0.37
7	03	0.15	0.4
8	01	0.05	0.66
9	00	-	1

III.2 La relation entre la fiabilité et la maintenance

Tous les équipements d'une installation industrielle sont soumis à des mécanismes de dégradation dus aux conditions de fonctionnement et/ou d'environnement : usure, fatigue, vieillissement. Face aux défaillances qui en résultent, on peut se contenter de pratiquer une maintenance corrective, mais on n'évite pas ainsi les conséquences des pannes que l'on subit. Une attitude plus défensive consiste à mettre en œuvre une maintenance préventive destinée à limiter, voire à empêcher, ces défaillances, mais on court alors le risque de dépenses excessives et d'indisponibilités inutiles.

Devant cette situation, le responsable de maintenance ne doit plus se contenter de surveiller et de réparer, il doit envisager des stratégies. Une part de son travail consiste à prévoir les événements et à évaluer les différentes alternatives qui s'offrent à lui pour trouver la solution optimale, ou tout au moins pour s'en rapprocher. Les forces dont il dispose, limitées par ses moyens techniques et financiers, doivent être placées aux bons endroits.

C'est dans ce contexte que la maintenance s'est dotée de méthodes qui considèrent à la fois, et plus ou moins, la technique et l'organisation. Les industries de processus ont générale appliquée des démarches alliant une évaluation des risques, une analyse du retour d'expérience, et une logique de sélection de tâches de maintenance. L'Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité (OMF).

III.2 .1 Principales liaisons fiabilité –maintenance

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

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

3. La fréquence des opérations de maintenance corrective est fonction des taux de panne ou risques de panne De plus, nous pouvons dire que la maintenance corrective, faisant diminuer le taux de panne, améliore la fiabilité.
4. Considérons le problème suivant : dans une entreprise, on se fixe un nombre N (t) d'équipements identiques qu'on veut maintenir en service à chaque instant ; on se demande alors comment réaliser cet objectif ? Grâce à la fiabilité, on peut donner une réponse à cette question. Dans le cas particulier où :

$$(t) = N_0 = C^{te}\ et\ (t) = C^{te} \qquad \text{(III.9)}$$

5. Le nombre d'équipements à remplacer, depuis l'instant zéro jusqu'a à l'instant θ.
6. Intéressons-nous à un élément mis en fonctionnement à l'instant zéro et demandons-nous combien peut-il y avoir de renouvellements dans l'intervalle de temps (0, t) ? Evidemment, cette question est sans réponse stricte ; mais, lorsqu'on connaît la fiabilité de l'élément on peut calculer la probabilité pour qu'il y ait ou bien 1 ou bien 2 ou bien 3 renouvellements. On peut aussi calculer le nombre moyen de renouvellement dans (0, t). Dans le cas particulier où le taux de panneest constant, le nombre de renouvellements dans (0, t) est distribué selon la loi de Poisson.
7. Les opérations de maintenance préventive sont à effectuer lorsque la fonction risque de panne est croissante, les époques de renouvellement sont alors déterminées à partir des caractéristiques de fiabilité des éléments considérés.[7]

III.3 la fiabilité prévisionnelle

Elle estime la fiabilité future d'un système à partir de considérations sur la conception du système et la fiabilité opérationnelle (supposée connue) de ses composants.
Cette estimation repose très souvent sur l'évaluation du "taux de défaillance" probable et du "temps moyen de non défaillance".

Mathématiquement la fiabilité nommée R(t) d'un système S est donnée comme suit :

$$R(t) = \text{probabilité (S non défaillant sur } [0, t])$$

On notera F(t), la fonction définie par F(t) = 1 - R(t) ; c'est la probabilité complémentaire (ou événement contraire). Donc F(t) est la probabilité de défaillance à l'instant t. Cette fonction est caractérisée par un taux de défaillance $\lambda(t)$ (inverse du temps moyen de bon fonctionnement MTBF) [11].

Chapitre IV : Maintenabilité des systèmes

IV.1 Définition

« Dans les conditions d'utilisation données pour lesquelles il a été conçu, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits. » (NF EN 13306).

Maintenabilité = être rapidement dépanné

C'est aussi la probabilité de rétablir un système dans des conditions de fonctionnement spécifiées, en des limites de temps désirées, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits [7].

IV.2 Maintenance et maintenabilité

Pour un technicien de maintenance, la maintenabilité est la capacité d'un équipement à être rétabli lorsqu'un besoin de maintenance apparaît. L'idée de « facilité de maintenir » se matérialise par des mesures réalisées à partir des durées d'intervention.

l est évident que la maintenabilité intrinsèque est le facteur primordial pour que la maintenance soit performante sur le terrain. En effet, une amélioration ultérieure de la maintenabilité initiale n'est jamais chose facile.

Il est donc indispensable que la maintenance sache définir ses besoins et les intègre au cahier des charges d'un équipement nouveau afin que celui-ci puisse être facilement maintenable [7].

IV.3 Maintenabilité et disponibilité

La notion FMD (Fiabilité Maintenabilité Disponibilité) constitue les indices principaux d'une bonne pratique de la maintenance ainsi qu'une stratégie d'optimisation des activités de maintenance au sein d'une entreprise.

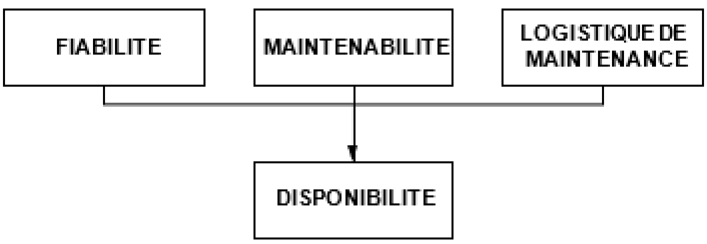


Figure 4.1 Composantes de la disponibilité d'un équipement [7]

Le schéma ci-dessus rappelle les composantes de la disponibilité d'un équipement. Il met en évidence :

- Que la maintenabilité est un des leviers d'action pour améliorer la disponibilité et donc la productivité d'un équipement.
- Que la fiabilité et la maintenabilité sont deux notions parallèles de même importance (et dont les démarches d'analyse sont semblables).

La maintenabilité s'exprime à l'aide du MTTR (Mean Time To Repair) , moyenne des temps de de réparation ou temps moyen d'une réparation.

IV.4 Maintenabilité intrinsèque

Pour construire une maintenabilité intrinsèque ; on doit prendre certain nombre de critères intégrés dès la conception d'un nouvel équipement. On cite les plus importants à savoir :

- Modularité et interchangeabilité
- Standardisation
- Accessibilité
- Aptitude à la pose et à la dépose
- Démontabilité
- Détectabilité

La maintenabilité peut être calculée à partir du MTTR (moyenne des temps de réparation). Selon l'expression suivante :

$$MTTR = \frac{Temps\ de\ maintenance\ total}{Nombre\ de\ reaparation} \qquad \text{(IV. 1)}$$

u est le taux de réparation exprimé par :

$$\boldsymbol{u = 1/MTTR} \qquad \text{(IV. 2)}$$

Mathématiquement la maintenabilité est exprimée par la formule suivante :

$$\boldsymbol{M(t) = 1 - e^{-\int_0^t u(x)dx}}$$

Si u constant cela implique que :

$$\boldsymbol{M(t) = 1 - e^{-ut}} \qquad \text{(IV. 3)}$$

IV.5 Maintenabilité opérationnelle

La maintenabilité opérationnelle **:** elle est mesurée à partir des historiques d'interventions.

IV.6 Approche mathématique de la Maintenabilité

Comme nous l'avons signalé précédemment que la maintenabilité se caractérise par sa MTTR (Mean Time To Repair) ou encore sa moyenne de temps techniques de réparation

La figure ci-dessous schématise les états successifs que peut prendre un système réparable :

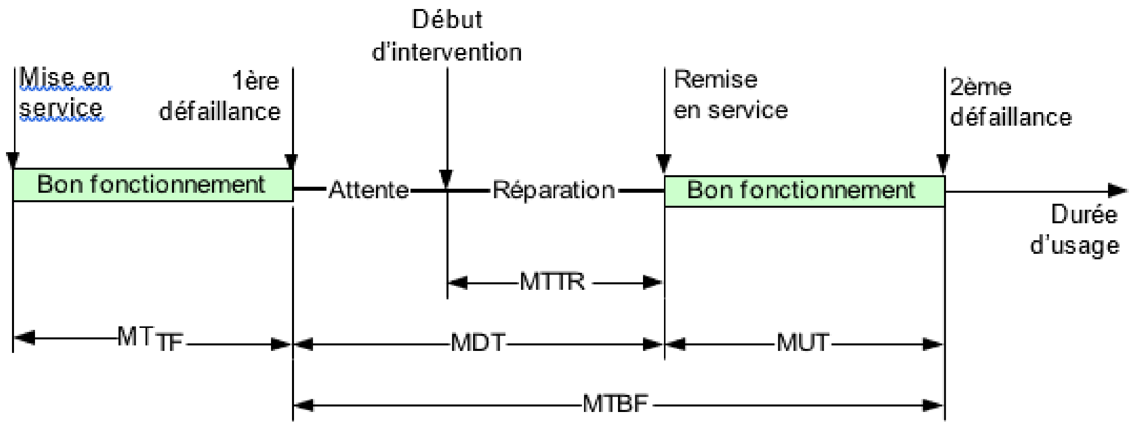


Figure 4.2 Etats successifs d'un système réparable [7]

Chapitre V : Disponibilité des systèmes

V.1 Introduction

La disponibilité est la probabilité pour qu'une entité soit en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données à instant t, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée. On la note D(t) ou A(t). C'est la traduction du nom anglais : Availability [11]

$$D(t) = P\ \{\text{Système non défaillant à l'instant } t\}$$

Le fonctionnement à l'instant t ne nécessite pas forcément le fonctionnement sur [0, t], pour un système réparable ; c'est là que se situe la différence fondamentale avec la fiabilité.

V.2 Définition et formes de disponibilité

La bonne politique de maintenance de toute entreprise est basée principalement sur la disponibilité de son matériel ; ce qui influe directement sur son rendement. Pour qu'un équipement ait une bonne disponibilité il doit reprendre ses fonctions facilement une fois tombé en panne et cause le moins possible d'arrêts de production de l'entreprise.

Seuls les temps d'arrêts intrinsèques, appelés aussi « temps d'arrêt propres » et caractérisés par la MTI (moyenne des temps d'indisponibilité), seront relevés pour évaluer la disponibilité opérationnelle d'un système.

La disponibilité est un maillon qui allie les notions de fiabilité et de maintenabilité. Comme elle dépend de plusieurs facteurs.

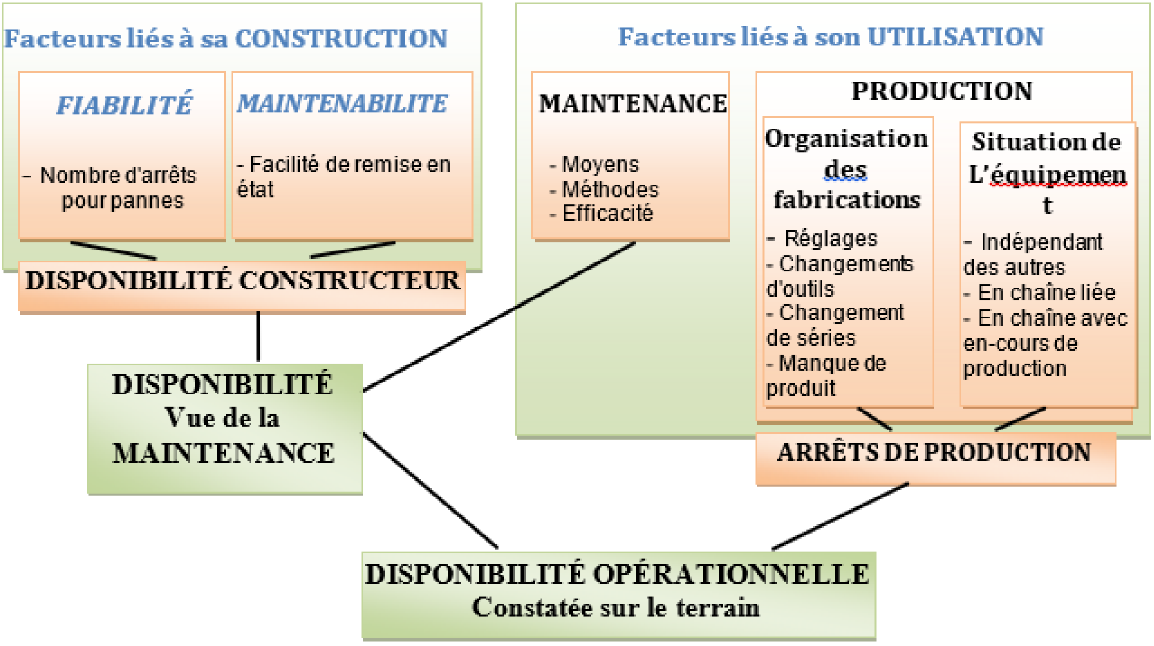


Figure 5.1 Relation entre les concepts de la sureté de fonctionnement [7]

La fiabilité seule ne suffit pas à définir l'efficacité d'un système, il faut en mesurer la disponibilité lorsque le système est multi composants.

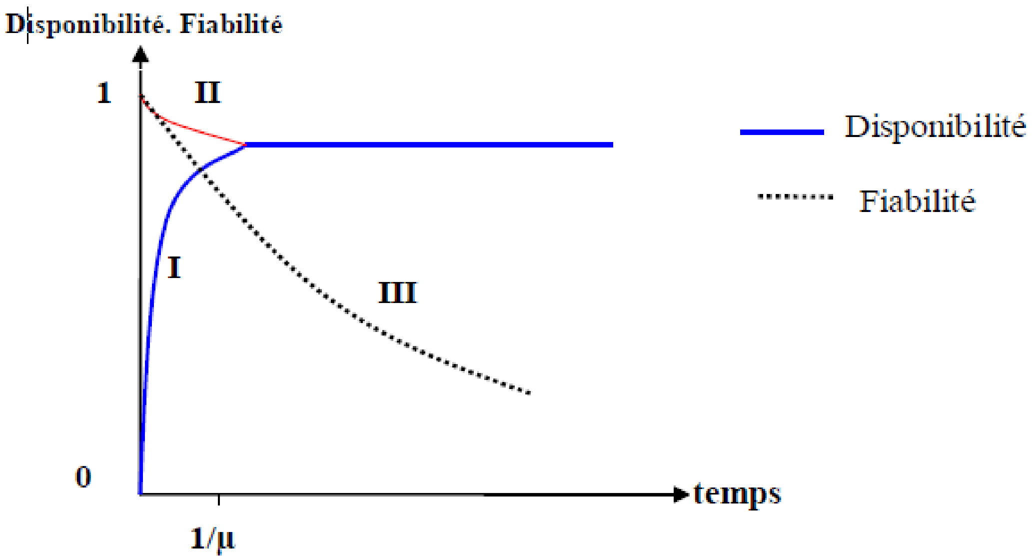


Figure 5.2 Disponibilité en régime stationnaire [18]

La disponibilité de l'ensemble tend rapidement vers un régime stationnaire :
A l'instant initial, panne **(courbe I),**
Bon fonctionnement **(courbe II) ,**
La fiabilité est rapidement assimilable à une exponentielle **(courbe III)**

V.3 Quantification de la disponibilité

La disponibilité peut se mesurer :

- Sur un intervalle de temps donné (disponibilité moyenne),
- A un instant donné (disponibilité instantanée),
- Ala limite, si elle existe, de la disponibilité instantanée lorsque t→∞ (disponibilité asymptotique)

V.3.1 Disponibilité moyenne

La disponibilité moyenne est évaluée par la formule :

$$D_{à} = \frac{tepms\ de\ disponibilité}{temps\ de\ disponibilité + temps\ d'indisponibilité} \qquad (v.1)$$

$$\text{Ou } D_0 = \frac{TCBF}{TCBF+TCI} \qquad (v.2)$$

Ou :

- TCBF = temps cumulé de bon fonctionnement
- TCI = Temps cumulé d'immobilisation.

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

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

$$\frac{temps\ moyen\ de\ disponibilité}{temps\ moyen\ de\ disponibilité + temps\ moyen\ d'indisponibilité} = \frac{TMD}{TMD+TMI} \qquad (v.3)$$

En anglais: ***TMD*** = MUT (Mean Up Time) et ***TMI*** = MDT (Mean Down Time).

V.3 .2 Disponibilité intrinsèque

La disponibilité instantanée, A(t) est la probabilité que le système soit en opération au temps

t si, à chaque panne, une action de maintenance est entreprise pour remettre le système en état de fonctionnement. De façon stationnaire, la proportion du temps de bon fonctionnement sur un horizon infini (UTR pour Up Time Ratio) ou A(t) [18].

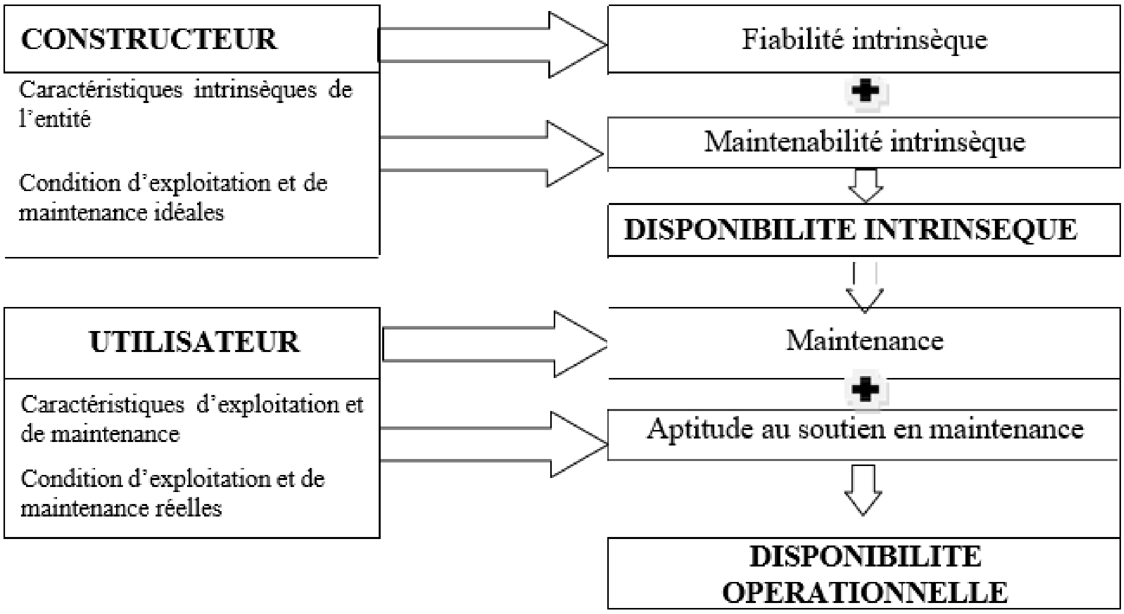


Figure 5.3 les concepts de la disponibilité

La disponibilité intrinsèque s'exprime par :

$$D_i = \frac{TBF}{TBF+TTR+TTE} \qquad (v.4)$$

Où :

TBF : temps de bon fonctionnement

TTR : temps techniques de réparation

TTE : temps techniques d'exploitation

Exemple

Un fabricant de machines-outils prévoit en accord avec son client la disponibilité intrinsèqued'une machine en prenant compte des conditions idéales d'exploitation et de maintenance :

- Temps d'ouverture mensuel = 400 heures
- 1 changement de fabrication par mois = 6 heures
- Maintenance corrective mensuelle : taux de défaillance = 1 pannes / mois ; TTR estimé = 4heures
- Maintenance préventive mensuelle = 3 heures

  Avec :

  TBF *=400 – 6 – 4 – 3 = 387 heures*

  TTR *= 4 + 3 = 7 heures*

  TTE *= 6 heures*

Solution :

$$D_i = \frac{387}{387+7+6}$$

V. 3.3 Disponibilité opérationnelle

Il s'agit de prendre en compte les conditions réelles d'exploitation et de maintenance. C'est la maintenance du point de vue de l'utilisateur.

Le calcul de D_o se fait en prenant en compte les mêmes composants à savoir (**TBF**, **TTR** et **TTE)**

Mais pour ce cas ; les 3 paramètres ne sont plus basés sur les conditions idéales de fonctionnement mais sur les conditions réelles (historiques d'exploitation).

Exemple d'application [7]

Le responsable maintenance d'une entreprise a le fichier historique d'un matériel équipé d'un terminal de saisie des données de production. Ces données sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

N°	Défaillance	Cause	TBF en h.	TTR en h.
1	Moteur	Electrique	80	2
2	Moteur	Electrique	40	3
3	Broche	Mécanique	50	2
4	Broche	Mécanique	100	8
5	Avance	Electrique	60	5
6	Avance	Electrique	40	2
7	Lubrification	Mécanique	20	3
8	Lubrification	Hydraulique	5	4
9	Lubrification	Hydraulique	10	3
10	Lubrification	Hydraulique	20	1.25

1. Calculer le total des TBF.
2. Calculer le total des TTR.
3. Calculer la MTBF.
4. Calculer la MTTR.
5. Calculer la disponibilité intrinsèque.

Solution

N°	Défaillance	Cause	TBF en h.	Pièce de rechange	Coûts en €.	TTR en h.
1	Moteur	Electrique	80	Contacteur	300	2
2	Moteur	Electrique	40	Relais thermique	300	3
3	Broche	Mécanique	50	Courroie	150	2
4	Broche	Mécanique	100	Roulement	200	8
5	Avance	Electrique	60	Pignon	300	5
6	Avance	Electrique	40	Relais	150	2
7	Lubrification	Mécanique	20	Moteur	600	3
8	Lubrification	Hydraulique	5	Pignon	100	4
9	Lubrification	Hydraulique	10	Filtre	100	3
10	Lubrification	Hydraulique	20	Réservoir	0	1,25
			425			**33,25**

MTBF	MTTR	Di
42,5	**3,325**	**92,74%**

Chapitre VI: Sureté de fonctionnement

VI.1 Introduction

L'objectif principal de la sureté de fonctionnement (SDF) est d'atteindre le cas idéal de la conception. C'est-à-dire atteindre zéro accident, zéro arrêt, zéro défaut. Elle donne la possibilité d'augmenter la fiabilité et sureté des systèmes dans des délais et avec des couts raisonnables.

VI.2 Definition

La sûreté de fonctionnement est souvent appelée la science des défaillances; elle inclut leur connaissance, leur évaluation, leur prévision, leur mesure et leur maitrise. Il s'agit d'un domaine transverse qui nécessite une connaissance globale du système comme les conditions d'utilisation, les risques extérieurs, les architectures fonctionnelle et matérielle, la structure et fatigue des matériaux. Beaucoup d'avancées sont le fruit du retour d'expérience et des rapports d'analyse d'accidents [19].

VI.3 Bref historique

Le tableau ci-dessous présente un bref historique de la sûreté de fonctionnement.

Tableau 6.1: Bref historique de la sûreté de fonctionnement [19].

Période	Accidents
Jusqu'aux années 30 Approche intuitive : renforcer l'élément le plus faible Explosion poudrière (1794) Premiers systèmes parallèles et redondants Accident chemin de fer (1842) Approche statistique, taux de défaillance Titanic (1912) . . . Premières estimations de probabilité d'accidents d'avion Pugsley : premier objectif de safety Taux d'accident d'avion $\leq 10^{-5}$per ight hour	Explosion poudrière (1794) Accident chemin de fer (1842) Titanic (1912) . . .
Années 40	

Analyse des missiles allemands V1 (Robert Lusser) Loi de Murphy \If anything can go wrong, it will" Quantification de la disponibilité	
Années 50 Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment (AGREE) - Réduction des couts de maintenance - Augmentation de la fiabilité, MTBF	Tcheliabinsk 40 (1957)
Années 60 Analyses des modes de défaillance et de leurs effets Programmes de recherche spatiaux Arbre de défaillance (missile Minuteman) Arbres des causes (Boeing - NASA) Livres sur la fiabilité (ex. Barlow and Proschan)	Torrey Canyon (1967)
Années 70 Analyse des risques Collecte de données REX	
Années 80 à nos jours Nouvelles techniques (simulation, réseaux de Petri,..) Modélisation	Tchernobyl (1986) Ariane V (1996) DART (NASA, 2005) Vol Rio Janeiro. . .

VI.4 Principal concept

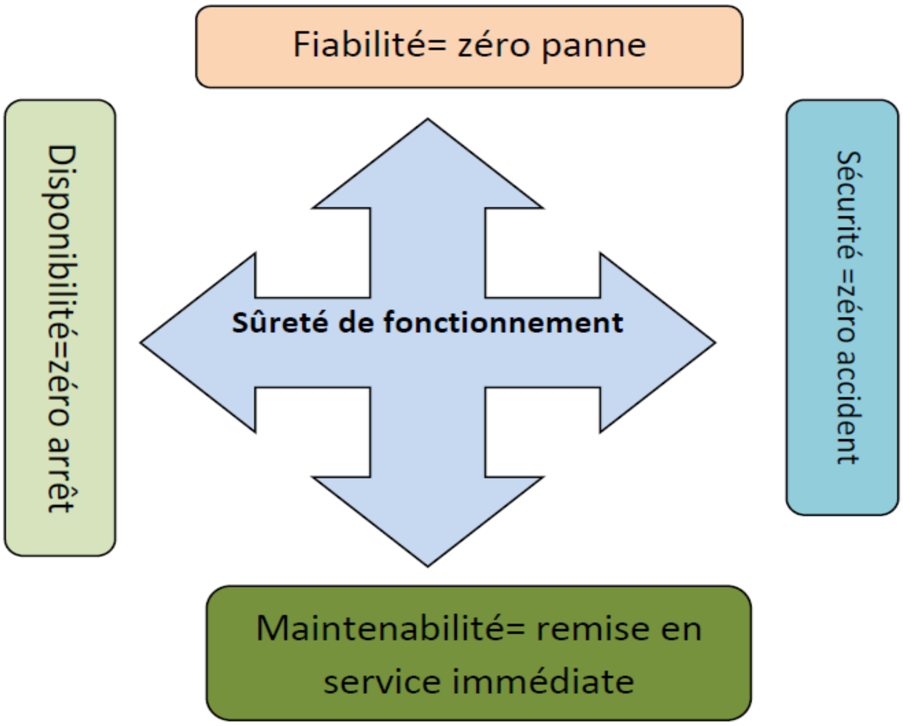


Figure 6.1 : Les éléments clés de la sûreté de fonctionnement [20]

VI.5 Taxonomie

La sureté de fonctionnement manipule un certain nombre de concepts que nous précisons dans cette partie en donnant des définitions précises. Généralement la SDF est composée de trois éléments principaux résumé dans la (figure 6.2) à savoir : les attributs, les entraves et les moyens.

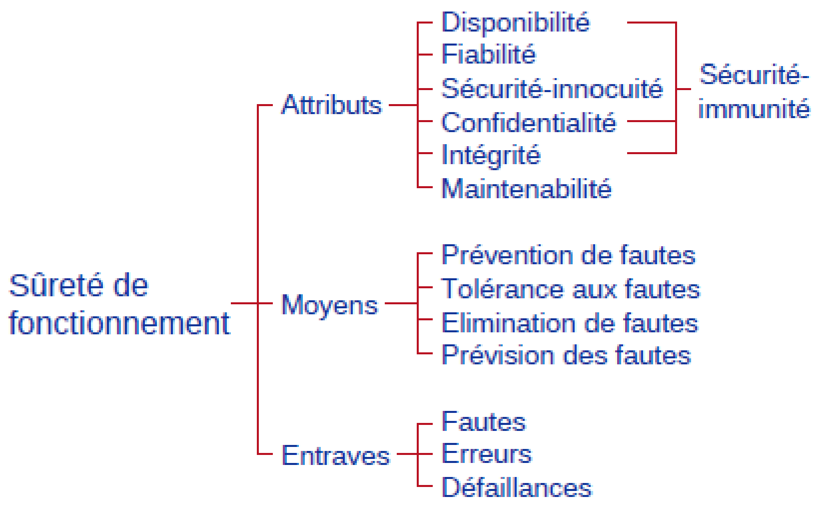


Figure 6 .2 Arbre de la sureté de fonctionnement [21]

VI.5.1 Entraves

Les entraves sont reparties en trois types : les fautes, les erreurs et les défaillances. Ils s'enchaînent comme illustré sur la figure 6.3.

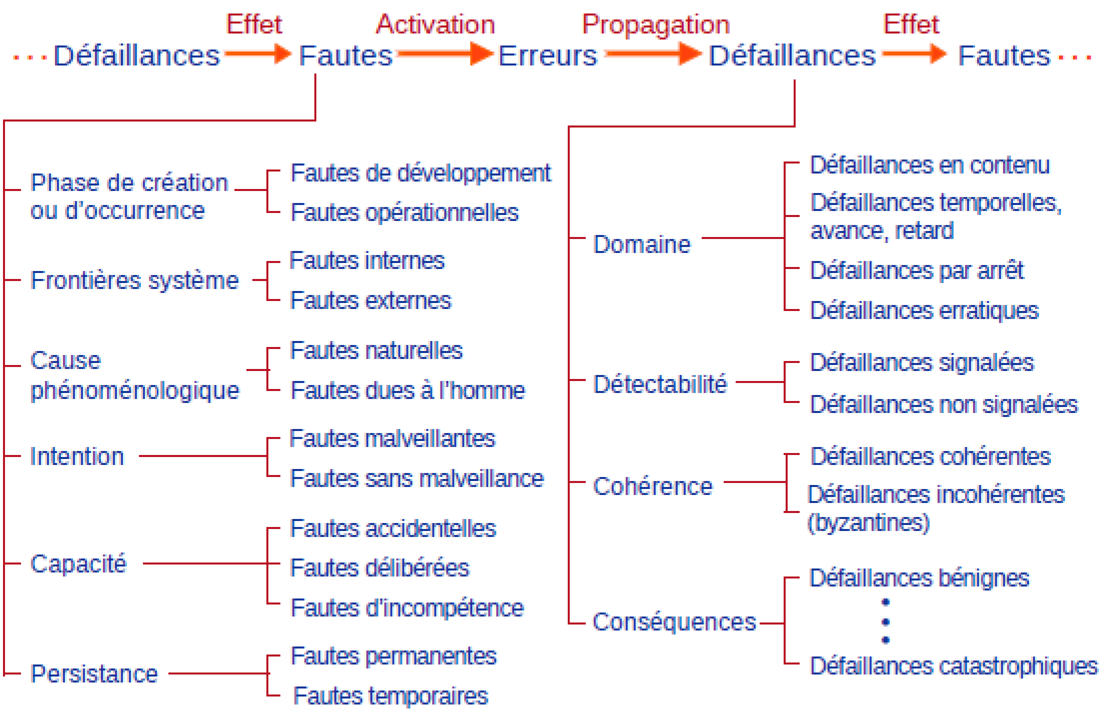


Figure 6.3 Enchainement et propagation des erreurs [21]

VI.5.2 Attributs

Les attributs de la sureté de fonctionnement sont parfois appelés FDMS pour Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité et Sécurité (RAMSS pour Reliability, Availability, Maintainability, Safety, Security).

VI.5.3 les moyens

Les moyens sont des solutions éprouvées pour casser les enchainements Faute ! Erreur ! Défaillance et donc améliorer la fiabilité du système.
La prévention de faute consiste à éviter des fautes qui auraient pu être introduites pendant le développement du système [21].

VI.6 Les méthodes d'évaluation de la sureté de fonctionnement

Une analyse prévisionnelle de sûreté de fonctionnement est un processus d'étude d'un système réel de façon à produire un modèle abstrait du système relatif à une caractéristique de sûreté de fonctionnement (fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité). Les éléments de ce modèle seront des événements susceptibles de se produire dans le système et son environnement. Plusieurs méthodes peuvent être utilisés tels que :

APR Analyse Préliminaire des Risques,
AMDE Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets,
MDF Méthode du Diagramme de fiabilité
MDS Méthode du Diagramme de Succès,
MTV Méthode de la Table de Vérité,
MAC Méthode de l'Arbre des Causes (etc …).

VI.6.1 Analyse préliminaire des risques (APR)

L'APR est une méthode couramment utilisée dans le domaine de l'analyse des risques. Il s'agit d'une méthode inductive, systématique et assez simple à mettre en œuvre. Concrètement, l'application de cette méthode réside dans le renseignement d'un tableau en groupe de travail pluridisciplinaire [22].
Le tableau utilisé est présenté ci-après :

Tableau N° 2 : Tableau de l'analyse préliminaire des risques [22]

Système								**Date**
N°	Produit Equipement	Evènement Redoté Central	Evènement Initiateur	Phénomène Dangereux	Intensité Cible Potentielle	G0	Barrières de sécurité indépendantes	Observations

VI.6.2 AMDE

L’analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) est une méthode proactive permettant de découvrir les défaillances potentielles des processus d'entreprise afin d'éviter qu'elles se produisent ou d'atténuer leurs effets en déterminant où elles peuvent se produire et leur impact. « AMDEC » c’est en effet ce terme qui est passé dans le langage courant des techniciens. Cependant, avant d’aborder l’AMDEC (analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leurs criticité), nous nous intéressons à l’AMDE (analyse des modes de défaillance, de leurs effets) pour les raisons suivantes :

La simple lecture de ces deux intitulés montre que la criticité viendra compléter l’AMDE pour donner l’AMDEC :

On réalise, dans tous les cas la partie AMDE, mais on ne procède pas toujours à l’évaluation de la criticité :

Les relations entre les défaillances et les effets (ou situations) qui en résultent constituent la partie AMDE, et il est fondamental de comprendre comment décrire ces relations.[23].

Références bibliographiques

[1] NF X 060-010 – AFNOR 1991

[2] Pagetti.C., sureté de fonctionnement, Enseeiht 2012.

[3] Chapouille.P., Fiabilité. Maintenabilité. Techniques de l'ingénieur, 6 : T4300-T4305, 1980.

[4] Belhadj D. A, Maintenance et sureté de fonctionnement, polycopié, Université Hassiba ben Bouali, Sétif, 2020

[5] Kahal .H, Réseaux Bayésiens Dynamiques : Application aux réseaux électriques, Mémoire de magister, Université des sciences et de la technologie d'Oran,2013

[6] Monchy.F, Maintenance méthodes et organisations, Dunod ,2007

[7] Bellaouar.A, Beleulmi.S., Cours Fiabilité, maintenabilité et disponibilité (FMD), Université Constantine1, 2014

[8] Heng. J, pratique de la maintenance préventive, Dunod,2005

[9] Breton, J. C., Processus stochastique. Université de Rennes1, 2013.

[10] Gaudoin, O. Fiabilité des Systèmes et des Logiciels, Notes de cours. Ensimag, 3_eme année. Université Joseph Fourier, Grenoble, 2011.

[11] Boudoukara Z, Méthodologie d'évaluation de maintenance pour les systèmes de production, Mémoire de magister, ENSET 2008.

[12] Delon. J., Cours Probabilités continues, Université Paris Descartes. France,2017.

[13] Benariba.H, cours, fiabilité et maintenance des systèmes électroniques, Faculté de Technologie, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2021

[14] Lucien MEVA'A. Cours de maintenance et fiabilité industrielle,4GIM, 2019

[15] Debbah.Y, Cours et TD, Introduction à la fiabilité, Université Frères Mentouri Constantine 1, 2020

[16] Houde. L, 7 Lois de probabilité, Université du Québec à Trois-Rivières, 2014

[17] Kerboua., La maintenance et son application dans la protection des équipements, La protection des équipements industriels et dans l'optimisation de la production, Editions universitaires européennes, 2022

[18] Halimi, Contribution à l'amélioration de la maintenance préventive des machines dynamiques dans l'industrie des hydrocarbures, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2014

[19] Belhadj D A, Polycopié de cours, Maintenance et sureté de fonctionnement, Université de Chlef., 2020.

[20] Aggabou.L, Support de cours SIE 205, Sûreté de fonctionnement, Université de Batna,2020.

[21] Pagetti.C, Module de sureté de fonctionnement, 3_eme TR - option SE, ENSEEIHT,2012.

[22] Bocahut.G, Analyse Préliminaire des Risques,2017.

[23] Faucher, Chapitre 1. Principes de l'AMDE, Pratique de l'AMDEC, Dunod 2009.