



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITEEL HADJ LAKHDAR « BATNA »
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GENIE INDUSTRIEL
LABORATOIRE D'AUTOMATIQUE ET PRODUCTIQUE « LAP »

Mémoire

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MAGISTER

OPTION : Génie Des Systèmes Industriels

Présenté par l'Ingénieur : NOUNE Mohamed Saïd

THEME

OPTIMISATION DES MESURES DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT

AU NIVEAU DE L'ONA BATNA

Soutenu le : Mois de Novembre 2015

Devant le Jury :

Présidente : **MCA. MOUSS Kinza Nadia**
Examineur : **MCA. DIB Abderahmane**
Examineur : **MCA. SMADI Hacène**
Encadreur : **Prof. MOUSS Mohamed Djamel**

Université de Batna
Université d'Oum El Bouaghi
Université de Batna
Université de Batna

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2014/2015

Résumé

Dans ce travail de mémoire nous travaillons sur l'application des lois de probabilité dans le domaine de la sûreté de fonctionnement en calculant les critères de la fiabilité et de la disponibilité des équipements industriels qui sont notre objectif afin de trouver une méthode d'aide à la décision pour élaborer un programme de maintenance des installations en respectant les contraintes.

Les lois de probabilité utilisées dans le calcul de la fiabilité sont la loi Exponentielle et en particulier la loi de Weibull, dans cette dernière loi on a utilisé les méthodes analytique et graphique pour la détermination des paramètres de fiabilité qui sont utilisés pour l'estimation du taux de défaillance et le temps moyen de bon fonctionnement des équipements en exploitation.

En dernier, le cas pratique de notre étude était basé sur les équipements de la station d'épuration « STEP de Timgad ». Cette étude nous a permis de trouver de résultats empiriques conformes avec la réalité observée au niveau de la station d'épuration.

Mots Clés : Fiabilité des Equipements, Probabilités, Défaillances, Pannes, Temps Moyen de Bon Fonctionnement.

Abstract

In this work, we are working on the application of the laws of probability in the functioning of the dependability when calculating the criteria of reliability and availability of industrial equipment. Our goal is to find a method to help the decision to develop a system maintenance program within the constraints.

The laws of probability used in calculating reliability are the exponential law and the Weibull distribution. The analytical methods used in this work aim to determine the reliability parameters of the studied equipment, and to estimate the failure rate and the average uptime of operating equipment.

Finally, the practical case of our case-study was based on the equipment of the treatment plant "STEP Timgad." This study allowed us to find empirical results consistent with the reality observed at the treatment plant.

Keywords: Reliability, Probability, Failures, Mean Time between Failures, Estimate.

Dédicace

DEDICACE

- ❖ *A La mémoire de mon père Abdelali et de ma grand-mère qu'ALLAH les accueille dans son vaste paradis*
- ❖ *A Mes Mères Bachra et Salima pour leur soutien et leur encouragement, qu'elles trouvent l'expression de mon grand amour.
Mes parents qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur, de persévérance et qui ont fait de moi une personne heureuse, comblée, mais surtout fière d'être leur fils*
- ❖ *A Mon Oncle le bien aimé : Mohamed Rachid pour ces conseils et son soutien.*
- ❖ *A mes chers frères et sœurs pour la patience et le dévouement dont ils ont fait preuve et pour m'avoir soutenu jusqu'au bout ; particulièrement mon frère Mohamed Badreddine qui m'a tant aidé, Amina, Hadjer, Merieme Hayat, Abdelmadjid Yacine Mohamed Taher et Zohra.*
- ❖ *A mon cher petit neveu NOUNE Abdelali.*
- ❖ *A Mon grand-père El Hachemi et ma grand-mère ZAZA.*
- ❖ *A Mes chères tantes Hayat, Safia et M'barka.*
- ❖ *A Mon cher Djeroudib Hocine*
- ❖ *A toute ma famille.*
- ❖ *A mes collègues de travail spécialement Adel et Amor pour leur disponibilité et leur soutien*

Je dédie ce modeste travail

Mohamed Saïd.

Remerciements

REMERCIEMENTS

Je remercie :

Avant tout *ALLAHLE TOUT PUISSANT* pour m'avoir donné la force, la patience et le courage toutes ces années d'études pour réaliser ce modeste travail.

Mr. *MOUSS Mohamed Djamel* pour m'avoir encadré, orienté et conseillé au long de ce travail, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité au long de ce travail.

Mon frère *Mohamed Badreddine* qui m'a fait profiter de la documentation et de ses conseils.

Mr. *FERAH Mohamed* pour la documentation mise à ma disposition, son aide précieuse et ses conseils.

A toute l'équipe de la Direction de la Zone de Batna pour leur soutien et leur aide spécialement Mr. *BENDERADJI Chakib* et Mr. *BENHALLOU Mohamed Fouzi*

A Mr. *CHENNAF Adel* et l'équipe de la *STEP Timgad* à leur tête Mr. *BENFARHI Amor*, *BELAALMI Zoubir* et *MESSAHÉL Hakim* pour leur aide, leur disponibilité tout au long de ce parcours de cette période d'étude.

Vivement les membres du jury :

Mm. *MOUSS Kenza Nadia*

Mr. *SMADI Hacène*.

Mr. *DIB Abderrahmane*.

Egalement tous mes enseignants de la première année du Magister.

Enfin, j'adresse tous mes remerciements à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce mémoire.

Mohamed Saïd.

Résumé

Dans ce travail de mémoire nous travaillons sur l'application des lois de probabilité dans le domaine de la sûreté de fonctionnement en calculant les critères de la fiabilité et de la disponibilité des équipements industriels qui sont notre objectif afin de trouver une méthode d'aide à la décision pour élaborer un programme de maintenance des installations en respectant les contraintes.

Les lois de probabilité utilisées dans le calcul de la fiabilité sont la loi Exponentielle et en particulier la loi de Weibull, dans cette dernière loi on a utilisé les méthodes analytique et graphique pour la détermination des paramètres de fiabilité qui sont utilisés pour l'estimation du taux de défaillance et le temps moyen de bon fonctionnement des équipements en exploitation.

En dernier, le cas pratique de notre étude était basé sur les équipements de la station d'épuration « STEP de Timgad ». Cette étude nous a permis de trouver de résultats empiriques conformes avec la réalité observée au niveau de la station d'épuration.

Mots Clés : Fiabilité des Equipements, Probabilités, Défaillances, Pannes, Temps Moyen de Bon Fonctionnement.

Abstract

In this work, we are working on the application of the laws of probability in the functioning of the dependability when calculating the criteria of reliability and availability of industrial equipment. Our goal is to find a method to help the decision to develop a system maintenance program within the constraints.

The laws of probability used in calculating reliability are the exponential law and the Weibull distribution. The analytical methods used in this work aim to determine the reliability parameters of the studied equipment, and to estimate the failure rate and the average uptime of operating equipment.

Finally, the practical case of our case-study was based on the equipment of the treatment plant "STEP Timgad." This study allowed us to find empirical results consistent with the reality observed at the treatment plant.

Keywords: Reliability, Probability, Failures, Mean Time between Failures, Estimate.

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure.II.1	Disponibilité d'une Entité..... 46
Figure.II.2	Courbe de la Densité de Probabilité de Défaillance $f(x)$ 49
Figure.II.3	Courbe Représentative de la Fonction $F(x)$ 49
Figure.II.4	Courbe de la Fonction de Fiabilité $F(x)$ 50
Figure.II.5	Courbe du Taux de Défaillance..... 51
Figure.III.1	Photo Représentant la Localisation de la STEP de la Ville de Timgad... 57
Figure.III.2	Photo Représentant le Plan de la STEP de la Ville de Timgad..... 59
Figure.III.3	Schéma Représentant le Fonctionnement de la STEP de la Ville de Timgad..... 60
Figure.III.4	Photo Représentant l'Etape du Dessablage et Déshuilage de l'Ouvrage du Prétraitement..... 62
Figure.III.5	Photo Représentant l'Ouvrage du Bassin Biologique..... 63
Figure.III.6	Photo Représentant l'Ouvrage de la Clarification..... 63
Figure.III.7	Photo Représentant l'Ouvrage de Désinfection..... 64
Figure.III.8	Photo Représentant l'Ouvrage du Pompage de Boues..... 65
Figure.IV.1	Histogramme Représentant la Fréquence des Pannes Observées..... 71
Figure.IV.2	Histogramme Représentant le Fréquences Cumulées des Pannes..... 71
Figure.IV.3	Courbe de la Distribution des Pannes..... 78
Figure.IV.4	Courbe de la Loi Exponentielle de la Fiabilité $F(x)$ 78
Figure.IV.5	Courbe de la Fonction de Réparation des Pannes $F(x)$ 79
Figure.IV.6	Courbe de la Détermination de la MTBF..... 79
Figure.IV.7	Tracé du Nuage des Points () de l'Ouvrage Clarificateur..... 90
Figure.IV.8	Tracé du Nuage des Points () de l'Ouvrage Pompage des Boues.... 90
Figure.IV.9	Tracé du Nuage des Points () de l'Ouvrage Prétraitement..... 91
Figure.IV.10	Tracé du Nuage des Points () de la STEP de Timgad..... 91
Figure.IV.11	Tracé Manuel sur le Papier de Weibull de l'Ouvrage Clarificateur..... 92
Figure.IV.12	Détermination des Paramètres() par une Droite Ajustée..... 95

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau.II.1 Principaux Caractéristiques des Principaux Lois de la Sûreté de Fonctionnement.....	44
Tableau.II.2 Principaux Caractéristiques de la Sûreté de Fonctionnement.....	47
Tableau.II.3 Calcul des Fonctions $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ et $\lambda(t)$.....	48
Tableau.II.4 Calcul du Taux de Défaillance $\lambda(t)$.....	51
Tableau.IV.1 Nombre de Pannes et des Equipements de la STEP de Timgad.....	69
Tableau.II.2 Recensement des Observations Relevées de la STEP de Timgad.....	70
Tableau.IV.3 Estimation de la Fiabilité $R(i)$ Suivant l'Echantillon Etudié.....	72
Tableau.IV.4 Estimation Empirique de la Fiabilité et la MTBF de la STEP.....	73
Tableau.IV.5 Calcul des Paramètres de la Loi Exponentielle.....	75
Tableau.IV.6 Calcul des Fonctions de la Loi de Weibull pour l'Ouvrage Clarificateur.....	81
Tableau.IV.7 Calcul des Fonctions de la Loi de Weibull pour l'Ouvrage Pompage des Boues.....	82
Tableau.IV.8 Calcul des Fonctions de la Loi de Weibull pour l'Ouvrage Prétraitement.....	83
Tableau.IV.9 Calcul des Fonctions de la Loi de Weibull pour la STEP de Timgad.....	85
Tableau.IV.10 Calcul des Paramètres de la Régression (x,y).....	94
Tableau.IV.11 Calcul des Fonction $F(t)$, $R(t)$, $\lambda(t)$ par la Loi de Weibull.....	96
Tableau.IV.12 Table Numérique de la Loi de Weibull.....	97
Tableau.IV.13 Détermination des Paramètres (β,η,γ)et MTBF de la Loi de Weibull des Différents Ouvrages et de la STEP.....	98

Nomenclature

NOMENCLATURE

A(t)	: Disponibilité au Temps [%]
CEN	: Comité Européenne de Normalisation
E	: Entité
F(t)	: Fonction de Réparation [%]
f(t)	: Fonction de Distribution [%]
M(t)	: Maintenabilité
MDT	: Moyenne des Temps d'Arrêt Propre (Mean Down Time)
MTBF	: Moyenne des Temps entre Défaillances (Mean Time Between Failure)
MTTF	: Moyenne des Temps avant la Première Défaillance (Mean Time To First Failure)
MTTR	: Moyenne des Temps de Réparation (Mean Time To Repair)
MUT	: Moyenne des Temps de Disponibilité (Mean Up Time)
N	: Taille de l'Echantillon
n	: Nombre d'Eléments à l'Instant
R(t)	: Fiabilité au Temps [%]
TBF	: Temps de Bon Fonctionnement
t	: L'instant (t)
β (Béta)	: Paramètre de Forme de la Loi de Weibull
η (Eta)	: Paramètre d'Echelle de la Loi de Weibull [h]
λ (Lambda)	: Taux de Défaillance [Nbr/h]
γ (Gamma)	: Paramètres de Localisation de la Loi de Weibull [h]

SOMMAIRE

SOMMAIRE

	Page
DEDICACE.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
RESUME.....	III
LISTE DES FIGURES.....	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	V
NOMENCLATURE.....	VI
SOMMAIRE.....	VII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : GENERALITE SUR LA SURETE DE FONCTIONNEMENT	
HISTORIQUE.....	4
1. SURETE DE FONCTIONNEMENT.....	9
1.1. Définition.....	9
1.2. Indicateurs de la Sûreté de Fonctionnement.....	12
1.2.1. Temps de Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité.....	12
2. SYSTEMES ET COMPOSANTS.....	14
2.1. Définition.....	14
2.2. Nature des Systèmes.....	16
2.3. Principales Caractéristiques d'un Système.....	16
3. DFAILLANCES.....	17
3.1. Quelques Définitions Normalisées Utiles.....	18
3.2. Typologie des Défaillances.....	18
3.3. Causes de Défaillances.....	19
3.3.1. Défaillances de Causes Intrinsèques	19
3.3.2. Défaillances de Causes Extrinsèques.....	19
3.4. Evolution du Taux de Défaillance dans le Temps.....	20
3.5. Défaillances des Dispositifs.....	21
3.5.1. Dispositif Réparable.....	21
3.5.2. Dispositif Non Réparable.....	22
3.5.3. Espérance de Vie -MTBF-.....	22
4. ANALYSE PREVISIONNELLE DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT.....	23
4.1. Prévion de la Sureté de Fonctionnement.....	23
4.2. Méthodes d'Analyse.....	24
4.3. Démarches Inductive et Dédutive.....	24
4.4. Principales Etapes.....	25
5. CONCLUSION.....	27
CHAPITRE II : MATHEMATIQUE DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT	
1. PROBABILITE D'EVENEMENTS.....	29

SOMMAIRE

1.1. Théorème de Poincaré.....	30
1.2. Théorème des Probabilités Conditionnelle.....	30
1.3. Théorème des Probabilités Totales.....	31
1.4. Théorème de Bayes.....	31
2. VARIABLE ALEATOIRES.....	32
2.1. Définition.....	32
2.2. Principales Lois de Probabilité Utilisées.....	33
2.2.1. Lois Discrètes.....	33
2.2.2. Lois Continues.....	34
3. RELATIONS FONDAMENTALS DANS LE DOMAINE DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT.....	38
3.1. Définitions et Principales Caractéristiques.....	38
3.2. SURETE DE FONCTIONNEMENT ET LES PRINCIPALES LOIS DE PROBABILITES.....	39
3.2.1. Densité de Défaillance et de Réparation, MTTF et MTTR.....	39
3.2.2. Taux de Défaillanc et de Réparation.....	40
3.2.3. Taux de Défaillance et MTTF.....	42
3.2.4. Fiabilité et Disponibilité.....	45
4. Exemple d'Application.....	48
4.1. Calcul des Fonctions $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$, $\lambda(t)$	48
4.2. Représentation des Fonctions $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$, $\lambda(t)$	48
4.2.1. Densité de Probabilité $f(t)$	48
4.2.2. Fonction de Réparation $F(t)$	49
4.2.3. Fiabilité de Fiabilité $R(t)$	50
4.2.4. Taux de Défaillance $\lambda(t)$	50
5. CONCLUSION.....	51
CHAPITRE III : PRESENTATION DE L'ENTREPRISE	
1. PRESENTATION GENERALE.....	53
1.1. Office National de l'Assainissement.....	53
2. STATION D'EPURATION - STEP -.....	55
2.1. Qu'est-ce qu'une Station d'Épuration?.....	55
2.2. Que Traite une Station d'Épuration?.....	56
3. PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE.....	57
3.1. Situation Géographique.....	57
3.2. Situation Démographique.....	58
4. PRESENTATION DU SYSTÈME D'ETUDE.....	58
4.1. Station d'Épuration des Eaux Usées (STEP de Timgad).....	58
4.1.1. Historique de la STEP de Timgad.....	58
4.1.2. Impact de la Station d'Épuration.....	58
4.1.3. Caractéristiques de la STEP de Timgad.....	58
4.2. Description des Différents Ouvrages de la STEP de Timgad.....	59
5. FONCTIONNEMENT DE LA STATION D'EPURATION.....	61
CHAPITRE IV : ETUDE DE CAS	
1. ANALYSE ET APPLICATION.....	67
1.1. Collecte des Données.....	68

SOMMAIRE

1.2. Calcul des Paramètres $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$, $\lambda(t)$ et $MTBF$	68
2. ESTIMATION EMPIRIQUE.....	68
2.1. Données de Départ.....	68
2.2. Traitement de l'Echantillon Etudié.....	72
3. APPLICATION DES LOIS.....	74
3.1. Application de la Loi Exponentielle.....	74
3.1.1. Méthodologie de l'Application de la Loi Exponentielle.....	74
3.2. Application de la Méthodologie.....	74
3.2.1 Calcul des Paramètres de la Loi Exponentielle.....	76
3.2.2 Calcul de la Probabilité de Fonctionnement $f(t)$, $R(t)$ et $F(t)$	77
4. APPLICATION DE LA LOI DE WEIBULL.....	80
4.1. Méthodologie de l'Application de la Loi de Weibull.....	80
4.2. Application de la Méthodologie.....	80
4.2.1 Préparation des Données.....	80
4.2.2. Tracé du Nuage des Points et la Droite D_1 de Weibull.....	89
4.2.3. Détermination des Valeurs des Paramètres (β , η , γ).....	93
4.2.4. Détermination des Fonction $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$, $\lambda(t)$ de la Loi de Weibull.....	96
4.2.5. Détermination de la Valeur de $MTBF$	96
4.2.6. Exploitation des Résultats.....	98
5. CONCLUSION.....	99
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	100
BIBLIOGRAPHIE.....	101
ANNEXE.....	102

Introduction Générale

Face au développement du système industriel, la Sûreté de Fonctionnement, qui est une science jeune dont les concepts continuent à évoluer, s'est progressivement révélée être un élément fondamental dans la connaissance parfaite du comportement des différents équipements et leurs interactions vis-à-vis des défaillances pouvant apparaître.

La Sûreté de Fonctionnement est un ensemble de paramètres caractérisant les comportements d'un système vis-à-vis des fautes pouvant apparaître. Elle englobe les notions habituelles de fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité. On peut même la considérer comme la propriété d'un système telle que ses utilisateurs puissent placer une confiance justifiée dans le service qu'ils en attendent. Il y aura lieu de fournir aux concepteurs des éléments leur permettant d'effectuer des choix et de s'assurer que la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité du dispositif satisfait aux exigences de l'utilisateur.

Le dysfonctionnement qui est l'état de fonctionnement anormal peut avoir des conséquences graves sur l'environnement, la santé des personnes, les vies humaines, l'arrêt de production, la non conformité des produits, pertes financières,...

Dans la Sûreté de Fonctionnement il existe une relation directe entre ses différentes notions, exprimée par des méthodes de calcul probabilistes permettant une estimation empirique de ces notions qui sont distribuées suivant une loi mathématique.

Le travail de ce mémoire est organisé selon les chapitres suivants :

Le **Chapitre I**, après un historique sur l'évolution de la Sûreté de Fonctionnement depuis le dernier siècle jusqu'à ce jour nous avons traité tout d'abord dans une première partie les définitions, les notions et les indicateurs de la SDF, puis les systèmes et les composants ainsi que leurs principales caractéristiques, ensuite les défaillances et leurs définitions normalisées, typologie et causes, l'évolution du taux de défaillance dans le temps, la dernière partie comporte les différentes méthodes d'analyse prévisionnelle et leurs démarches.

Le **Chapitre II**, celui des principaux concepts mathématiques nécessaires aux calculs dans le domaine de la Sûreté de Fonctionnement, après avoir abordé la théorie des probabilités, dans la dernière partie de ce chapitre nous abordons les mesures, leurs

Introduction Générale

principales relations, les formulations mathématiques classiques des lois probabilistes continues et discrètes et les caractéristiques de chaque loi.

Le **Chapitre III**, celui de la présentation de l'entreprise qui comporte un historique sur l'Office National de l'Assainissement (ONA), présentation de la Station d'Épuration de la ville de Timgad et son fonctionnement.

Le **Chapitre VI**, dans ce chapitre nous avons étudié la fiabilité et la disponibilité des équipements de la station d'épuration de la STEP de Timgad avec le calcul des paramètres des lois de probabilités utilisées (loi Exponentielle et loi de Weibull) tel que la densité de probabilité, fonction de réparation et la fiabilité, le taux de défaillance de la station ainsi que son MTBF. Dans la deuxième partie de ce chapitre des interprétations et des recommandations seront données dans le but d'améliorer le bon fonctionnement des équipements de la station en étude.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA SURETE DE FONCTIONNEMENT

HISTORIQUE

Jusqu'à la Renaissance et au-delà, on a toujours pensé que la fiabilité d'une chaîne reposait sur celle de son maillon le plus faible. Ainsi, si R était la fonction de fiabilité (ou de survie), alors en fonction du temps, on pensait pouvoir écrire : $R_{chaîne}(t) = \min_{1 \leq i \leq n} R_i(t)$, où les items indexent les n maillons de la chaîne. Or, il s'est avéré que, dans une chaîne, ce n'était pas systématiquement le maillon le plus faible qui se rompait en premier. La fiabilité de la chaîne est alors devenue une certaine fonction de la fiabilité de ses maillons, les plus faibles participant davantage que les plus solides à l'éventualité d'une rupture.

- **L'époque moderne**

Par la suite, des problèmes de fiabilité se sont posés lors de la conquête de l'Ouest. Les composants mécaniques les plus critiques de l'époque étaient les roulements à billes des locomotives à vapeur ! De même, les freins de ces mêmes locomotives, en service entre 1861 et 1883, seront abandonnés pour des problèmes de fiabilité, notamment sur les connexions électriques entre les wagons, et les premiers freins pneumatiques les remplaceront.

Ceux-ci sont toujours d'actualité. La houille blanche, cette nouvelle énergie électrique, va constituer une formidable source de puissance qu'il va rapidement falloir apprendre à domestiquer et à fiabiliser.

Les premiers appareils construits dans cette optique (transformateurs, lignes de tension, interconnexions de lignes) vont permettre de diffuser l'énergie grâce à la mise en redondance et à l'amélioration des matériels, mais engendreront des problèmes de sûreté dramatiques.

C'est l'absence préalable d'étude de sûreté approfondie qui coûtera au métro parisien ses 84 morts en 1903, puis au Titanic son naufrage en 1912.

Durant la 1ère Guerre Mondiale, les bateaux construits rapidement pour amener les soldats américains sur le sol européen ne résisteront que très difficilement aux eaux gelées de l'Atlantique Nord, subissant beaucoup de fissures dans les coques et de multiples naufrages.

- **Les années 1930**

Dès 1930, les transports aériens commencent à collecter des informations statistiques sur les moteurs et les accidents des appareils. Les premiers objectifs quantifiés sont promus par le capitaine A.F.Pugsley de la 7ème brigade d'infanterie canadienne, entre 1939 et 1942, avec un taux de défaillance évalué à 10-5/h pour les avions, dont 10-7/h pour leur structure.

- **Les années 1940**

Les années 1940 voient le formidable essor des techniques de fiabilité. En Allemagne, W. Von Braun met au point ses V1 et revient sur l'idée que la fiabilité d'une chaîne est celle de son maillon le plus faible, en essayant de prouver que la fiabilité d'une chaîne est la moyenne de la fiabilité de ses constituants. Les essais montreront que cette hypothèse était également erronée. C'est Eric Pieruschka qui va finalement donner la formule de calcul de la fiabilité d'une chaîne : $R_{chaîne}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$. La probabilité de survie d'une chaîne à une date t arbitraire est le produit des probabilités de survie de chacun de ses composants à cette date, dans l'hypothèse où lesdits composants sont indépendants les uns des autres. Aux Etats-Unis, pendant ce temps, les nouvelles techniques permettent de gagner un facteur 4 sur la durée de vie des moteurs de traction des locomotives, pour dépasser le million de miles. Puis naît, en 1949, la loi de Murphy, peut-être mieux connue sous le nom de "loi de l'empoisonnement maximum" ou "loi de la tartine beurrée" : dès qu'il existe une possibilité que les choses tournent mal, elles tournent mal ! E. Murphy, l'ingénieur américain amateur de philosophie qui formula cette loi, ne voulait pas en donner une impression si pessimiste. Il cherchait simplement à s'assurer que ce qui venait de lui arriver ne se reproduirait jamais. Le capitaine Murphy, alors affecté au projet MX981 de l'armée américaine, venait d'achever une série de tests sur un avion à réaction. Il devait, par ailleurs, étudier les conséquences de la décélération brutale sur les pilotes d'essai. Il avait donc mis au point une combinaison équipée de 16 capteurs de mesure répartis sur le corps du pilote. Murphy savait pouvoir y accorder sa totale confiance, mais ce jour-là aucun des capteurs n'enregistra la moindre information.

Les vérifications permirent de constater que l'appareil de mesure fonctionnait normalement, et que les câbles assurant la liaison avec la combinaison du pilote étaient en parfait état de marche. L'erreur ne pouvait donc résider que dans les capteurs eux-mêmes. Que quelques-uns aient pu connaître une défaillance n'aurait rien eu d'exceptionnel. Mais il semblait très peu probable que tous aient cessé de fonctionner en même temps. En fait, les

capteurs ne pouvaient fonctionner qu'à condition d'être branchés dans le bon sens. Or, ce jour-là, le technicien qui avait réalisé les branchements les avait tous effectués à l'envers.

Résultat : aucune mesure n'avait été enregistrée.

La probabilité d'une telle erreur est presque nulle. Raison de plus pour prendre toutes les précautions afin d'éviter un tel désastre. Pour ce faire, on se fonde sur l'hypothèse de travail, raisonnable et à la fois presque paranoïaque, formulée par Murphy lorsqu'il rendit compte de l'échec total de ces expériences : "S'il existe deux ou plusieurs moyens de réaliser une opération, et si l'un d'eux peut mener à la catastrophe, il est certain que quelqu'un l'emploiera". Aujourd'hui encore, cette loi résonne dans l'esprit de tout ingénieur responsable d'un système censé être à toute épreuve. La formule connut un succès immédiat. Quelques mois plus tard, on la répétait dans les bases les plus isolées de l'armée de l'air américaine. Le capitaine n'avait fait qu'exprimer une frustration connue de tous les ingénieurs. Neuf ans plus tard, elle passait à la postérité en apparaissant pour la première fois, sous le nom de "Murphy's Law" dans un dictionnaire anglais. Soixante ans plus tard, cette loi est toujours d'actualité : il faut reconnaître qu'elle n'a pas son égale pour expliquer les catastrophes. Mais une formule populaire n'a pas forcément de fondement. D'ailleurs, la plupart des scientifiques considèrent que la loi de Murphy ne peut être considérée comme une loi au sens physique du terme.

- **Les années 1950**

On assiste à l'avènement du concept de maintenance : \$1 en équipement génère \$2 en maintenance. C'est à cette époque que la marine militaire américaine prend conscience que ses tubes électroniques ne sont opérationnels qu'à hauteur de 30 % de leur temps d'utilisation.

Les premières directives en électronique voient le jour, avec des spécifications d'essais de vieillissement accéléré, directives qui seront reprises et adaptées par la NASA. Les toutes nouvelles centrales nucléaires entraînent les premières études sur la fiabilité humaine.

En France, c'est le Centre national d'Etudes sur les Télécommunications qui commence ses travaux sur un recueil de données de fiabilité électronique.

- **Les années 1960**

Les industries aéronautiques et spatiales (Mac-Donnell Douglas) effectuent les premières analyses relatives aux défaillances de composants, pour accompagner les débuts du programme Apollo.

Dans le nucléaire, on assiste aux premiers pas de la méthode du Diagramme de Succès. L'armée américaine (DoD : Department of Defence) promulgue les premières vraies exigences de sûreté de fonctionnement suite à des accidents sur des missiles. Aux Bell Labs, en 1961, le nouveau concept d'arbre des causes est utilisé avec succès sur le projet de missile Minuteman ; cette technique sera reprise par Boeing. En France, la SNIAS (Société nationale des Industries aéronautiques et spatiales) utilise la méthode des combinaisons de pannes sur le projet Concorde, puis sur Airbus. Toutes ces méthodes trouvent un écho favorable dans l'industrie civile, notamment au Japon ; apparaissent alors les premières bases de données et les premiers ouvrages de référence.

Dans un souci d'harmonisation et de standardisation, la Commission électrotechnique internationale crée le Comité technique 56 "Dependability" en octobre 1965 ; les produits de ce groupe deviendront des normes internationales en 1976. L'Académie des Sciences accueille le mot "fiabilité" dans sa terminologie en 1962. En 1965 est introduit le concept de maintenabilité sur lequel le CEA travaillera activement dans les années 67-68.

- **Les années 1970-80**

En 1971 sont publiés les résultats des premiers travaux sur la fiabilité du logiciel. En 1972, EDF et le CEA mènent les premières études exhaustives sur le nucléaire. En 1975, le rapport américain Rasmussen présente une évaluation complète d'un risque nucléaire sur les centrales de Surry 1 et Peach Bottom 2 : en synthèse, le risque calculé pour les populations avoisinant lesdites centrales est inférieur à celui que font courir les chutes de météorites. En 1979, c'est la catastrophe nucléaire de TMI (Three Miles Island) ; une manière inattendue de promouvoir les outils de sûreté de fonctionnement, puisque le scénario qui a mené à la catastrophe était quasiment décrit dans le rapport Rasmussen ! Puis ce sont les industries pétrochimiques qui procèdent à leurs premières études de risque, avant que les techniques de sûreté de fonctionnement ne soient diffusées dans la chimie, le ferroviaire, l'automobile, le traitement et l'épuration d'eau, et l'ensemble des grands secteurs industriels.

- **Aujourd'hui**

La réglementation, et les certifications qu'elle impose, a eu un double effet : le développement de l'utilisation des outils de sûreté de fonctionnement, mais également une certaine idée de la couverture des risques.

N'a-t-on pas oublié que, malgré les études, les précautions, les systèmes de sauvegarde, les protections, le risque existe toujours ?

Dans les procès qui font suite aujourd'hui à la plupart des accidents, il semble que la notion de risque ait été peu à peu effacée pour laisser place à celle de tort ou responsabilité. Comme si tous les risques de notre vie courante pouvaient être prévus et annihilés.

En parallèle, la compétition continue que se livrent les grands groupes les force à disposer d'une productivité la meilleure possible, et donc à réduire les arrêts de production et à maximiser la disponibilité de leurs équipements.

Enfin, la sécurité des biens et des personnes n'a jamais semblé aussi importante qu'aujourd'hui aux yeux de nos concitoyens. En témoignent les actions vigoureuses autour de la notion de malveillance (intrusion par effraction, attaque, vol, piratage).

Dans les deux cas, la pression médiatique et écologique autour des accidents notables (plate-forme Piper Alpha, accident chimique de Bophal et d'AZF, ou catastrophe aérienne de la TWA) est telle qu'elle entraîne des conséquences très lourdes pour l'entreprise.

1. SURETE DE FONCTIONNEMENT

1.1. Définitions :

Au sens large, la Sûreté de Fonctionnement sera définie comme la Science des Défaillances ; elle inclut ainsi leur connaissance, leur évaluation, leur prévision, leur mesure et leur maîtrise.

Au sens strict, la sûreté de fonctionnement est l'aptitude d'une entité à satisfaire à une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données.

La norme X 60-500 définit une liste de termes utilisés dans le domaine de la fiabilité, maintenabilité et disponibilité, applicable à tous les biens à usages industriel, professionnel ou grand public.

Elle peut être caractérisée par les concepts suivants :

- **La Fiabilité :**

La norme NF X 06-501 définit la fiabilité de manière suivante : « Aptitude d'un bien à accomplir une fonction dans des conditions requises pendant un temps donné. Caractéristique d'un bien exprimée par la probabilité qu'il accomplisse une fonction requise dans des conditions données, pendant un temps donné ».

La fiabilité correspond à l'aptitude de la machine à produire le plus longtemps possible, sans arrêt pour cause de pannes. Plus le temps de fonctionnement est long entre deux pannes, plus la machine est fiable. Le temps de bon fonctionnement est révélateur de la fiabilité de la machine ou de l'installation.

La fiabilité est liée à la durabilité ou durée de fonctionnement potentielle d'un équipement (durée de vie). Alors que la durabilité constitue un objectif à atteindre, la fiabilité constitue l'incertitude ou la probabilité d'atteindre cet objectif. Elle est généralement mesurée par la probabilité qu'une entité E accomplisse une fonction requise, dans les conditions données, pendant l'intervalle de temps $[0, t]$:

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

L'aptitude contraire sera donnée « défiabilité », sa mesure est notée $\bar{R}(t)$.

$$R(t) = 1 - \bar{R}(t)$$

On distingue deux méthodes d'évaluation :

L'évaluation prévisionnelle de fiabilité effectuée à partir de banque de données existantes (peut être réalisée dès la conception d'un produit).

L'évaluation opérationnelle de fiabilité qui peut se réaliser en effectuant des essais lors du fonctionnement.

- **La Disponibilité :**

Selon les normes, la disponibilité correspond à « l'aptitude d'un dispositif ou d'une entité à être en état de fonctionner dans des conditions données ». On distingue deux types de disponibilité : intrinsèque et opérationnelle.

La disponibilité intrinsèque exprime le point de vue du constructeur, ce dernier a conçu et fabriqué le produit en lui conférant un certain nombre de caractéristiques intrinsèques, c'est-à-dire des caractéristiques qui prennent en compte les conditions d'installation, d'utilisation, de maintenance et d'environnement, supposées être idéales. La fiabilité intrinsèque ou primaire ne dépend que de la qualité du matériel qui démarre à un niveau de qualité initiale et n'est fonction que de facteurs naturels non liés à l'intervention humaine (température ambiante, taux d'hygrométrie, pollution atmosphérique, etc.).

La disponibilité opérationnelle ou extrinsèque prend en compte les conditions réelles d'exploitation et de maintenance, c'est la disponibilité du point de vue utilisateur. On prend en compte les temps d'arrêts dus à la machine et les temps logistiques. Ainsi, sont retenus les temps d'arrêts induits indépendants de la machine comme les attentes suite à des manques d'approvisionnement en matières premières ou pièces, les temps d'arrêts suite aux défaillances ou pannes imprévues, les temps d'arrêts suite à des manques de personnel. Contrairement à la précédente, elle est fonction des conditions de maintenance relatives à l'intervention humaine des techniciens chargés d'assurer la maintenance du matériel.

Généralement la Disponibilité est mesurée par la probabilité qu'une entité E soit en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant t donné :

$$A(t) = P[E \text{ non défaillante à l'instant } t]$$

L'aptitude contraire sera dénommée « indisponibilité », sa mesure est notée $\bar{A}(t)$

$$\bar{A}(t) = 1 - A(t)$$

- **La Maintenabilité :**

C'est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits.

La maintenabilité correspond à l'aptitude de la machine à être dépannée rapidement. Plus le temps d'intervention est court, meilleure est la maintenabilité, plus le temps de fonctionnement est long entre deux pannes, plus la machine est fiable.

La maintenance est généralement mesurée par la probabilité que la maintenance d'une entité (E) accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits, soit achevée au temps t , sachant que l'entité est défaillante au temps $t = 0$:

$$M(t) = P[\text{la maintenance de E est achevée au temps } t]$$

Dans un souci de simplification, on peut écrire :

$$M(t) = P[E \text{ est réparée sur } [0, t]]$$

L'aptitude contraire sera dénommée « immaintenabilité » ; sa mesure est notée $\bar{M}(t)$

$$M(t) = 1 - \bar{M}(t)$$

Cette notion ne concerne que les systèmes réparables. En d'autres termes, la maintenabilité caractérise l'aptitude d'un système à répondre l'accomplissement de sa fonction (ou de ses fonctions) après une défaillance.

- **La Sécurité :**

C'est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des évènements critiques ou catastrophiques.

La sécurité est généralement mesurée par la probabilité qu'une entité E évite de faire apparaître, dans des conditions données, des évènements critiques ou catastrophiques.

L'aptitude contraire sera dénommée « insécurité ».

D'une manière générale, d'autres concepts ont été introduits ces dernières années, ils peuvent être également inclus dans celui de sûreté de fonctionnement.

Citons de manière non limitative :

- **La Durabilité :**

Aptitude d'une entité à demeurer en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données d'utilisation et de maintenance jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint.

- **La Continuabilité :**

Aptitude d'un service, une fois obtenu, à continuer d'être fourni dans des conditions données et pendant la durée voulue.

- **La Serviabilité :**

Aptitude d'un service à être obtenu à la demande d'un usager et à continuer d'être fourni pendant la durée voulue, avec des tolérances spécifiées et dans des conditions données.

1.2. Indicateurs de la Sûreté de Fonctionnement :

1.2.1. Temps de fiabilité, maintenabilité et disponibilité

- **Définitions :**

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

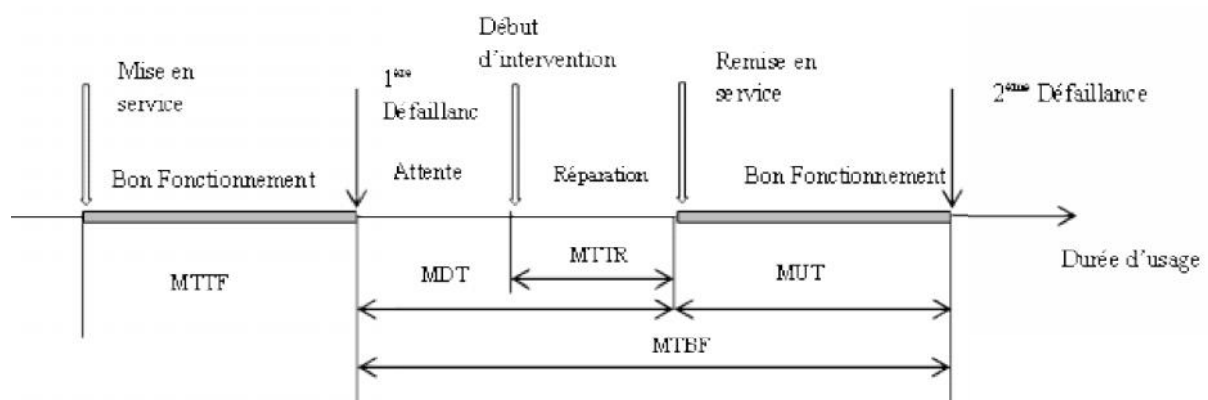


Figure.I.1. Durées Caractéristiques de la Sûreté de Fonctionnement

Les durées caractéristiques de la sûreté de fonctionnement en fait, les grandeurs portées par le graphe sont des durées (TBF) auxquelles on fait correspondre des moyennes (MTBF) obtenues par exploitation statistique $m(t)$ ou probabiliste $E(t)$ des n durées constatées et enregistrées.

Les sigles utilisés sont d'origine anglo-saxonne et correspondent aux notions suivantes :

- MTTF (mean time to [first] failure) : temps moyen avant-première défaillance.
- MTBF (mean time between failure) : temps moyen entre deux défaillances successives
- MDT ou MTI (mean down time) : temps moyen d'indisponibilité ou temps moyen d'arrêt propre.
- MUT (mean up time) : temps moyen de disponibilité.
- MTTR (mean time to repair) : temps moyen de réparation.

• **Quelques commentaires :**

Le MUT est différent du MTTF ; lorsqu'un système est remis en service après réparation, tous les composants défaillants n'ont pas été nécessairement réparés et le MUT caractérise cette durée moyenne de fonctionnement jusqu'à la prochaine défaillance. Le MTTF caractérise la durée moyenne de fonctionnement d'un système qui aurait été complètement réparé avant la remise en service.

On a la relation suivante : $MTBF = MUT + MDT$.

Une autre signification est parfois donnée à MTBF : Moyennes des Temps de Bon Fonctionnement. Cette définition est celle que nous donnons au MTTF ou au MUT. Cependant, pour de nombreux systèmes, MDT est faible devant MUT ; la différence entre MTTF et MTBF est donc également faible.

2. SYSTEMES ET COMPOSANTS

2.1. Définition

Un **système** est un ensemble d'éléments interagissant entre eux selon certains principes ou règles. Un système est déterminé par :

- La nature de ses éléments constitutifs.
- Les interactions entre ces derniers.
- Sa frontière, c'est-à-dire le critère d'appartenance au système (déterminant si une entité appartient au système ou fait au contraire partie de son environnement).
- Ses interactions avec son environnement.

On note que la définition indique que le système est fait de composants en interaction ; on suppose ainsi que le système n'est pas simplement égal à la somme de ses sous-systèmes, ou de ses composants ! En outre, si la nature physique d'un sous-système ou d'un composant se modifie à la suite d'une défaillance, le système est lui-même modifié. C'est ainsi qu'en toute rigueur un système dans lequel un élément est défaillant devient un nouveau système différent du précédent. On prend, par exemple, le cas d'un avion à quatre réacteurs ; on suppose qu'un réacteur est en panne. Le nouveau système (avion avec seulement 3 réacteurs en fonctionnement) est très différent du précédent, par exemple, pour les caractéristiques à l'atterrissage. On imagine qu'un deuxième réacteur est en panne. Il existe ainsi 6 configurations différentes possibilités de perdre deux réacteurs et donc 6 configurations envisageables pour l'atterrissage ; une panne supplémentaire au moment de l'atterrissage peut alors avoir des conséquences très différentes suivant la configuration dans laquelle on se trouve.

On peut trouver dans la littérature d'autres termes tels que dispositif, pièce, sous-système, équipement avec des définitions qui diffèrent suivant les domaines industriels. Aussi dans un souci de clarification, on utilisera ici les notions de pièce, composant, sous-système, système élémentaire, système avec des relations inclusives suivantes :

$$(PIECE) \subset (COMPOSANT) \subset (SOUS - SYSTEME) \subset (SYSTEME ELEMENTAIRE) \\ (SYSTEME)$$

A titre d'exemple, une installation chimique, une centrale nucléaire ou un avion sont des systèmes :

- Le contrôle-commande qui est un système de sécurité.
- Une voie d'un système de sécurité constitué de 2 voies indépendantes (redondance) sera un sous-système.
- Une vanne, un relais seront des composants.
- L'opercule et la bobine seront des pièces respectivement, de la vanne et du relais.

Bien évidemment, rien n'empêche de considérer telle vanne comme un système élémentaire voire comme un ensemble de systèmes élémentaires.

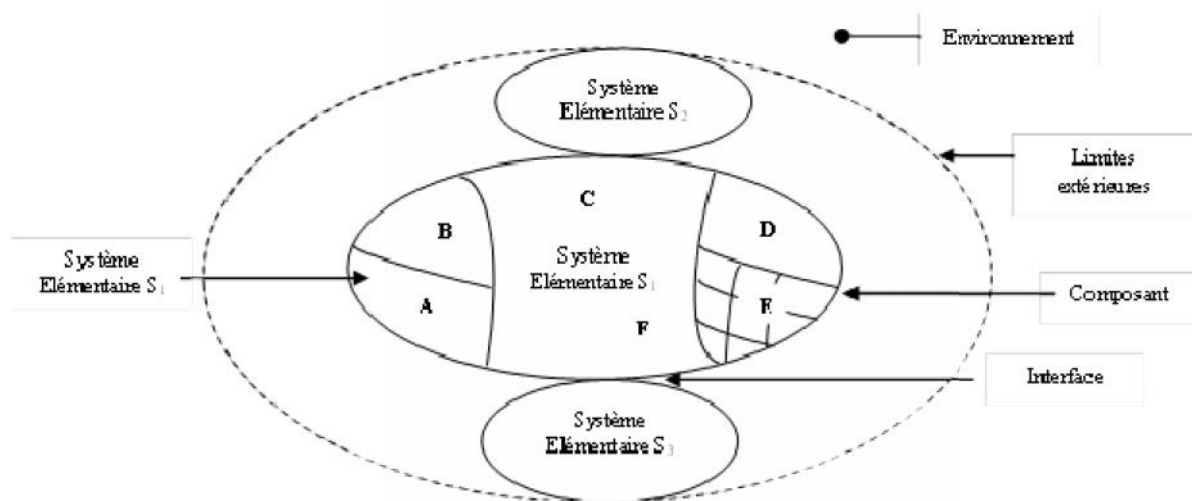


Figure.I.2. Représentation d'un Système

Ainsi, un système sera représenté par la figure ci-dessus ; il est caractérisé par :

- Les choix d'une limite de résolution définissent les composants considérés ; ceci fixera le niveau de détail de l'analyse qui sera effectuée sur le système. Les frontières entre les divers systèmes élémentaires seront dénommées « interface ».
- Le choix des limites extérieures et de l'environnement du système ; les limites extérieures enveloppent l'ensemble des systèmes en interaction avec le système étudié et sont déterminantes pour la compréhension du système et de ses fonctions.

2.2. Nature des systèmes

Les systèmes peuvent être de diverses natures technologiques :

- Systèmes électriques ou électroniques, logiques ou analogique, de contrôle-commande,
- Systèmes thermo-hydrauliques permettent de véhiculer des fluides,
- Systèmes mécaniques,
- Systèmes programmés, systèmes de traitement de l'information.

Une attention particulière sera accordée dans la notion de système aux opérateurs humains qui interviennent dans toutes les phases de la conception à l'exploitation des systèmes ; on peut éventuellement considérer comme un système élémentaire l'ensemble des opérateurs intervenant sur un système dans le cadre des opérations de test, de maintenance, de conduite incidentelle ou accidentelle.

Le concept de système peut être adapté au logiciel ; les instructions ou les modules en sont les composants. Le système logiciel est évidemment un système immatériel.

2.3. Principales Caractéristiques d'un Système

Tout système se définit généralement par une ou plusieurs fonctions (ou missions) qu'il doit accomplir dans des conditions et dans un environnement donnés (performances requises) à partir de composant déterminés.

Les caractéristiques les plus importantes d'un système qui méritent d'être précisées avant l'analyse sont :

a) Les fonctions du système :

- Les fonctions ou missions principales.
- Les fonctions ou missions secondaires qu'il ne faut pas oublier.
- Le degré d'importance de ces fonctions.

b) La structure du système :

- Les différents composants, leur rôle, leurs caractéristiques et performances.
- Les relations entre composants (connexions par exemples).
- La localisation des composants.

c) Les conditions de fonctionnement du système :

- Les états de fonctionnement.
- Les conditions de fonctionnement des composants et du système.
- Les changements de configuration.

d) Les conditions d'exploitation du système :

- Les conditions de surveillance du système (alarmes, inspections, vérifications, tests périodiques...).
- Les conditions d'interventions sur le système (maintenance préventive, corrective...).
- Les spécifications techniques d'exploitation c'est-à-dire les conditions à respecter pour exploiter le système.

e) L'environnement du système :

- Les autres systèmes élémentaires de l'installation ou du processus global dans lequel se situe le système étudié (les systèmes auxiliaires par exemple).
- L'ensemble des opérateurs humains intervenant sur le système.
- L'environnement proprement dit qui peut se manifester par des conditions ambiantes défavorables (poussière, humidité), des conditions météorologiques particulières (gel, neige) ou des agressions externes d'origine naturelle (séisme) ou industrielle (chute d'avion..).

Au cours des différentes étapes du projet d'un système, toutes ces données ne sont pas connues d'emblée, et par conséquent des approximations et hypothèses sont nécessaires. Au fur et à mesure que la conception du système progresse et que ces différentes informations peuvent être précisées, les analyses de sûreté de fonctionnement devront être corrigées, modifiées, c'est-à-dire réactualisées.

3. LES DEFAILLANCES :

Pour qu'elles deviennent sources de profit, les défaillances peuvent être prises en compte à deux niveaux :

- par les analyses postdéfaillances qui ont pour objectif l'amélioration de la disponibilité d'un équipement en service.
- par les analyses prévisionnelles qui ont pour objectif la « construction » d'un niveau de sûreté de fonctionnement suffisant, avant même leur fabrication et leur

mise en service. Remarquons que les analyses prévisionnelles reposent sur les connaissances acquises grâce aux analyses postdéfaillances.

3.1. Quelques définitions normalisées utiles :

• **Défaillance** : « cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise ». Après une défaillance, le bien est en panne. Termes proches ou synonymes, mais non normalisés : failure en anglais, dysfonctionnement, défaut, faute, panne, avarie, dégradation, anormalité, dommage, erreur, incident, anomalie, arrêt fortuit, détérioration, etc.

• **Cause de défaillance** : « circonstances liées à la conception, à la fabrication, à l'installation, à l'utilisation et à la maintenance qui ont conduit à la défaillance ».

• **Mécanisme de défaillance** : « processus physiques, chimiques ou autres qui conduisent ou ont conduit à une défaillance ».

• **Mode de défaillance** : effet par lequel une défaillance se manifeste.

• **Panne** : « état d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures ».

• **Dégradation** : « évolution irréversible des caractéristiques d'un bien liée au temps ou à la durée d'utilisation ». Une dégradation peut conduire à la défaillance.

• **État dégradé** : « état d'un bien par lequel ce bien continue à accomplir une fonction avec des performances inférieures aux valeurs nominales ou continue à accomplir une partie seulement de ces fonctions requises ».

3.2. Typologie des défaillances

La norme AFNOR X 60-011 propose plusieurs mises en famille des défaillances, parmi lesquelles nous retiendrons :

- Suivant leur cause : défaillances liées à la conception, à la fabrication, à l'installation, etc.
- Suivant leur degré : défaillances partielles ou complètes, permanentes, fugitives ou intermittentes ;
- Suivant leur vitesse d'apparition : défaillances soudaines ou progressives. La défaillance soudaine « ne peut pas être anticipée par un examen ou une surveillance préalable » alors que la défaillance progressive peut l'être (critère de détectabilité). Par combinaison des deux : défaillance catalectique ou par

dégradation. La défaillance catalectique est soudaine + complète, alors que la dégradation est progressive + partielle.

Ajoutons à cette caractérisation les défaillances non détectées, car cachées ou latentes. Nous distinguerons en fiabilité les défaillances aléatoires, individuelles et de causes indépendantes et les défaillances dépendantes de cause commune ou de mode commun, ou en cascade (l'une provoque l'autre).

3.3. Les Causes de défaillances

3.3.1. Défaillances de causes intrinsèques ou inhérentes (définitions CEN)

Intrinsèques signifie qu'elles sont générées par le système lui-même, en condition normale de fonctionnement. Parmi les causes intrinsèques, la norme CEN (Comité Européenne de Normalisation) distingue :

- « Défaillance due à une conception inadéquate du bien ».
- « Défaillance due à une fabrication du bien non conforme à sa conception ou à des procédés de fabrication spécifiés ».
- « Défaillance due à une installation incorrectement réalisée ».

Les défaillances par usure (liées à la durée d'utilisation) et par vieillissement (liées au cours du temps) sont des défaillances intrinsèques.

3.3.2. Défaillances de causes extrinsèques (définitions CEN)

Les défaillances extrinsèques ne sont que des défaillances intrinsèques que l'on n'a pas su prévoir. La norme CEN permet de distinguer :

- « Défaillance de mauvais emploi, due à l'application de contraintes qui excèdent les capacités spécifiées du bien ».
- « Défaillance par fausse manœuvre, due à une manipulation incorrecte du bien ou un manque de précaution ».
- « Défaillance due à la maintenance, résultant d'une action inadaptée ou exécutée de façon incorrecte ».
- « Défaillance secondaire » conséquence d'une autre défaillance en amont (en cascade).

3.4. Evolution du taux de défaillance dans le temps

Si on prolonge l'expérience sur une durée importante, on observe en général une courbe d'évolution "en auge" :

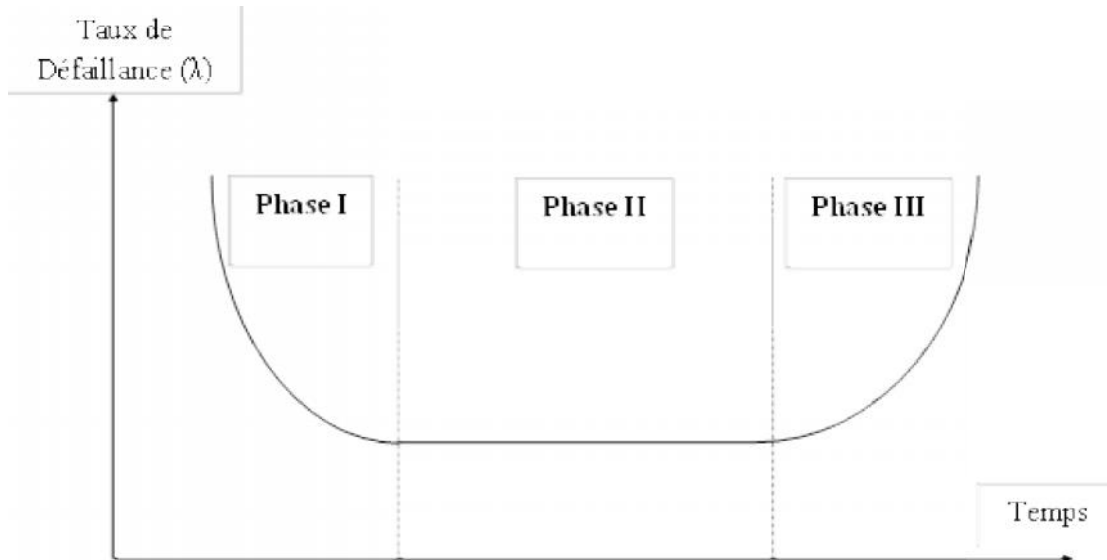


Figure.I.3. Courbe d'Evolution du Taux de Défaillance dans le Temps en Baignoire

Ceci met en évidence trois périodes:

- **Phase I** : une période dite de jeunesse pendant laquelle le taux de panne décroît rapidement. Cette période est aussi « **Période de défaillance précoce** » ; la défaillance qui survient au début de la vie d'une entité et dont le taux d'apparition est rapidement décroissant.
- **Phase II** : Une période normale à taux pratiquement constant (légèrement croissant pour certains types de composants en raison de l'usure), dite « **Période de défaillance à taux constant** » ; une défaillance qui apparaît avec un taux sensiblement constant pendant la durée de vie utile du matériel.
- **Phase III** : Une période de vieillesse où le taux augmente rapidement. Cette période est **souvent** inobservable en informatique, les composants étant jetés (car obsolètes) bien avant leur vieillissement (pas toujours, une souris par exemple s'use plus vite qu'elle ne devient obsolète), appelée « **Période de défaillance d'usure** » dont la défaillance qui apparaît avec un taux rapidement croissant.

3.5. Défaillances des dispositifs

Selon la norme NF X 06-501, une défaillance correspond à l'altération ou à la cessation de l'aptitude d'un bien à remplir une fonction requise.

La défaillance peut être intrinsèque ou primaire, inhérente aux faiblesses du dispositif ou extrinsèque par le fait que son origine est due à une cause extérieure (cas d'une mauvaise utilisation du matériel).

Différents critères peuvent être pris en considération pour distinguer les défaillances :

- Mode de défaillances.
- Causes de la défaillance.
- Fréquence de la défaillance.
- Rapidité de la manifestation.
- Degré de gravité.
- Conséquences ou effets de la défaillance.

On distingue deux types de dispositifs pouvant faire l'objet de défaillances : les dispositifs réparables et non réparables.

3.5.1. Dispositif réparable

Ce dispositif est caractérisé par la possibilité de remplacer un ou plusieurs constituants par d'autres constituants neufs et de même type, sans échange de ceux non défaillants.

La fiabilité d'un tel système est exprimée par :

- Le temps de fonctionnement t .
- La moyenne des temps de bon fonctionnement MTBF ou Mean Time Between Failure correspond au temps moyen de bon fonctionnement entre deux pannes :

$$\text{MTBF} = \text{Temps Total de Fonctionnement} / \text{Nombre de Défaillances}$$

- Le taux de défaillances s'exprime en nombre de défaillances par unité de temps (en général, en nombre de pannes par année) :

$$\text{Taux de Défaillance} = \lambda = 1 / \text{MTBF}$$

Remarque : Le taux de défaillances est le nombre de défaillances survenues entre t et Δt , rapporté au nombre en état de fonctionnement à l'instant t , soit $\lambda(t) = x/n$ avec n le nombre de défaillants entre t et Δt et x le nombre d'appareils encore en fonction à l'instant t . Nous verrons que le taux de défaillances s'exprime également par $\lambda(t) = f(t)/R(t)$.

- La MTFF ou *Mean Time to First Failure* ou temps moyen jusqu'à la première défaillance.

3.5.2. Dispositif non réparable

Ce dispositif est représenté par un constituant ou un composant généralement mécanique ou électronique ou un ensemble de pièces dont la défaillance entraîne le remplacement de l'ensemble.

La fiabilité d'un tel système est exprimée par :

- Le temps de fonctionnement t .
- Le taux de défaillances $\lambda = 1/MTBF$.
- La MTTF *Mean Time To Failure* ou durée de vie, exprimée en unité de temps de fonctionnement.

3.5.3. Espérance de vie ou MTBF

L'espérance de vie θ ou la moyenne des temps de bon fonctionnement (MUT = *Mean Up Time*) correspond à l'espérance mathématique des défaillances.

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

Définitions :

Pour les dispositifs réparables :

- MUT = Mean Up Time ou durée moyenne de bon fonctionnement.
- MDT = Mean Down Time = durée moyenne d'indisponibilité moyenne des temps d'arrêts.
- MTBF = Mean Time Between Failure = durée moyenne entre deux défaillances consécutives.
- MTTR = Mean Time To Repair = Moyenne des temps de réparation.

(Si $MTTR \ll MTBF$, on peut considérer que $MUT = MTBF$).

Pour les dispositifs non réparables :

- $MTTF = \text{Mean Time To Failure} = \text{durée de bon fonctionnement avant la première défaillance}$.

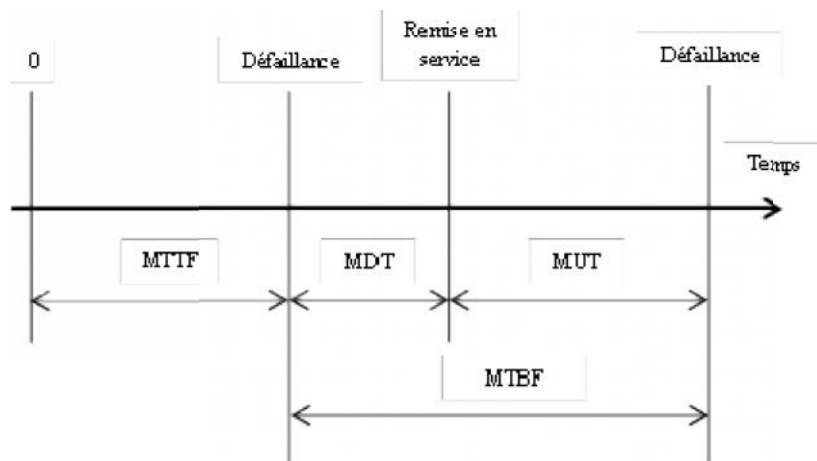


Figure.I.4. Cycle de Fonctionnement d'un Produit

4. ANALYSE PREVISIONNELLE DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT SYSTEME

4.1. Prévion de la sûreté de fonctionnement :

On parle d'analyse prévisionnelle de la sûreté de fonctionnement d'un système lorsque le processus, décrit précédemment, est orienté vers l'obtention d'un modèle relatif à une caractéristique de la sûreté de fonctionnement (fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité) du système.

Les éléments de ce modèle seront des événements susceptibles de se produire dans le système et son environnement, tels par exemple :

- Des défaillances et des pannes des composants du système.
- Des événements liés à l'environnement.
- Des erreurs humaines dans la phase d'exploitation.

Le modèle permet ainsi de représenter toutes les défaillances et les pannes (et leurs combinaisons) des composants du système qui comportent une des caractéristiques de sa sûreté de fonctionnement.

4.2. Méthodes d'analyse :

Afin d'aider l'analyse à réaliser un modèle de la sûreté de fonctionnement, des méthodes d'analyse ont été mises au point. Les principes sont :

- L'Analyse Préliminaires des Dangers (APD).
- L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE).
- La Méthode du Diagramme de Succès (MDS).
- La Méthodes de la Table de Vérité (MTV).
- La Méthode de l'Arbre des Causes (MAC).
- La Méthodes des Combinaisons de Pannes Résumées (MCPR).
- La Méthode de l'Arbre des Conséquences (MACQ).
- La Méthode du Diagramme Causes-Conséquences (MDCC).
- La Méthodes de l'Espace des Etats (MEE).

4.3. Démarches inductive et déductive :

On distingue deux types de démarche dans l'analyse de la sûreté de fonctionnement d'un système, l'inductive et la déductive.

- **Démarche inductive :**

On raisonne du plus particulier au plus général. Face à un système et à une défaillance, on étudiera de façon détaillée les effets ou conséquences de cette défaillance sur le système lui-même et/ou son environnement. Ainsi, par exemple, les analyses des conséquences de la perte d'un réacteur nucléaire sont de nature inductive. Les principales méthodes inductives sont les suivantes : l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets, la Méthode de la Table de Vérité, la Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées, la Méthode de l'Arbre des Conséquences.

- **Démarche déductive :**

On raisonne du plus général au plus particulier : supposant que le système est défaillant, on recherche les causes de cette défaillance. L'analyse et les enquêtes à la suite de catastrophes, pour en retrouver les causes, sont de nature déductive. La principale méthode déductive est la Méthode de l'Arbre des Causes.

4.4. Principales Etapes :

On distingue quatre étapes principales dans l'analyse prévisionnelle de la sûreté de fonctionnement d'un système.

- **Analyse technique et fonctionnelle :**

Cette étape est celle du recueil des premières informations relatives au système et à ses caractéristiques techniques et fonctionnelles. On cherche notamment à recueillir les informations relatives aux composants constituant le système.

Une première analyse fonctionnelle du système doit aboutir à identifier et à définir les principales fonctions du système. Il est non moins important de bien définir les limites extérieures du système.

C'est une étape préliminaire à l'analyse qualitative.

- **Analyse qualitative :**

Dès le début de cette étape, les objectifs de l'analyse de la sûreté de fonctionnement doivent être clairement définis : s'agit-il d'une étude de fiabilité, de disponibilité, de maintenabilité, ou de sécurité ? Quelles sont les fonctions importantes concernées par l'analyse ?

Les limites de résolution de l'analyse doivent être précisées. Faut-il aller dans l'analyse jusqu'aux composants décrits précédemment ? Faut-il aller jusqu'à un niveau de détail plus fin, c'est-à-dire jusqu'à des pièces de composants ?

La considération des éléments précédents doit aboutir à la proposition d'une décomposition du système en composants pour l'analyse. Bien évidemment, cette décomposition peut être différente de celle retenue dans la description du système. Il faut, en

effet disposer sur chaque composant d'informations relatives tant aux modes de défaillance et à leurs causes, qu'aux données de sûreté de fonctionnement associées.

On peut ainsi proposer une définition pratique et spécifique de la notion de composant : c'est la plus petite partie d'un système pour laquelle, d'une part, on peut préciser, a priori et sans ambiguïté ; les modes de défaillance et, d'autre part, on dispose de données quantitatives, sans qu'il soit nécessaire de décomposer l'élément lui-même pour en faire l'analyse.

Les méthodes de l'analyse qualitative ont ensuite pour objectif la recherche de toutes causes de défaillance pouvant affecter la sûreté de de fonctionnement du système. De nombreuses méthodes existent et l'art du spécialiste consiste alors à choisir les méthodes les plus adaptées aux objectifs de l'étude, au système à analyser et aux moyens dont il dispose.

L'utilisation de ces méthodes aboutit à une modélisation de la sûreté de fonctionnement du système et des défaillances l'affectent Cette modélisation est basée sur la décomposition retenue pour le système et sur un certain nombre d'hypothèses relatives Par exemple, au catalectique des défaillances, aux phases ou configurations de fonctionnement reconnues a priori importantes ou aux effets de telle défaillance.

Bien évidemment, la modélisation de la sûreté de fonctionnement d'un système est étroitement liée à la modélisation des phénomènes physiques auxquels donnent lieu les défauts du système.

D'une manière générale, l'analyse est conduite à effectuer un certain nombre d'hypothèses spécifiques à chaque étude. Ce sera le cas, entre autres, pour l'impact de l'environnement ou des autres systèmes sur le système étudié, la schématisation des opérations de tests ou de maintenance, le comportement de l'opérateur en situation normale ou incidentelle ou accidentelle.

Il est important de souligner que la qualité de l'étude entreprise dépendra directement de la modélisation effectuée. Celle-ci permet de recenser et d'obtenir les défaillances à prendre en compte (ou défaillances pertinentes) pour évaluer la sûreté de fonctionnement du système ; ces défaillances sont généralement des modes de défaillance de composants ou (et) leurs combinaisons.

Les enseignements tirés de cette analyse qualitative sont relatifs aux mécanismes de défaillance du système, aux combinaisons de défaillance menant à l'événement indésirable.

- **Analyse quantitative :**

La phase d'analyse quantitative consiste à caractériser par des mesures (probabilités, par exemple) la sûreté de fonctionnement du système. Ces probabilités sont obtenues par le traitement mathématique du modèle et par la prise en compte des données relatives aux événements élémentaires. Outre les données de sûreté de fonctionnement proprement dites et relatives aux composants, d'autres types d'informations de nature quantitative sont généralement nécessaires telles que :

- Les durées de fonctionnement (durée des missions, des phases de fonctionnement).
- Les caractéristiques des tests des systèmes en attente (fréquence et durée des tests).
- Les caractéristiques de la maintenance préventive ou corrective (fréquence et durée de la maintenance).
- Les données statistiques sur les agressions liées à l'environnement.

CONCLUSION

Dans ce chapitre on a traité les grands axes ainsi que les définitions des notions de la sûreté de fonctionnement avant d'aborder les principaux concepts mathématiques nécessaires pour le calcul des paramètres de la SDF dans le prochain chapitre.

CHAPITRE II

MATHEMATIQUE DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT

MATHEMATIQUE DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT

Les diverses méthodes que nous aurons à décrire supposant, bien entendu, des calculs plus ou moins complexes. Il a donc paru indispensable de présenter ici un exposé des principaux concepts mathématiques nécessaires aux calculs dans le domaine de la Sûreté de Fonctionnement. Après avoir abordé la théorie des probabilités, nous abordons les mesures de sûreté de fonctionnement et leurs principales relations.

1. PROBABILITES D'EVENEMENTS

Soit un ensemble des observables Ω . Considérons une application P qui associe, à chaque événement A , un nombre positif appelé probabilité, avec les propriétés suivantes :

- $P[\Omega] = 1$.
- $P[A, B] = P[A] + P[B]$ si $A, B = \emptyset$

Le triplet (Ω, \mathcal{A}, P) est appelé espace de probabilité.

L'application P possède les probabilités suivantes :

$$0 \leq P[A] \leq 1$$

$$P[\bar{A}] = 1 - P[A]$$

$$P[A \cup B] = P[A] + P[B]$$

Précisons maintenant les relations entre probabilité et fréquence. Supposons que, sur 100 essais de jets d'un dé, on observe 20 apparitions de la « face 1 ». La probabilité d'apparition de la « face 1 » est ainsi $20/100 = 0,2$ alors que sa probabilité d'apparition est $1/6$ si le dé est parfait et si chaque face a une équiprobabilité d'apparaître. Ce n'est que pour un nombre infini d'essais que la fréquence d'apparition de l'événement E se confondra avec la probabilité. Ce qui précède se résume de la manière suivante :

$$P[E] = \lim_{N \rightarrow \infty} [fr]$$

1.1. Théorème de Poincaré

$$P[A + B] = P[A] + P[B] - P[A \cdot B] \tag{II.1}$$

Cette propriété se généralise :

$$P\left[\sum_{i=1}^n A_i\right] = \sum_{i=1}^n P[A_i] - \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} P[A_i \cdot A_j] + \sum_{j=3}^n \sum_{k=2}^{j-1} \sum_{i=1}^{k-1} P[A_i \cdot A_j \cdot A_k] + (-1)^{n+1} P\left[\prod_{i=1}^n A_i\right]$$

Si les événements sont incompatibles :

$i, j : A_i \cdot A_j = \emptyset$ (Événements incompatibles 2 à 2, alors :

$$P\left[\sum_i^n A_i\right] = \sum_i^n P[A_i]$$

1.2. Théorème des probabilités conditionnelles

$$P[A \cdot X] = P[A/X] P[X] \tag{II.2}$$

$P[A/X]$ est la probabilité conditionnelle de l'événement A rapportée à l'événement X : c'est la probabilité que A se produise sachant que X s'est déjà produit.

Ainsi, par définition :

$$P[A/X] = \frac{P[A \cdot X]}{P[X]}$$

On en déduit:

$$P[A_1, A_2, \dots, A_n] = P[A_1/(A_2, \dots, A_n)] P[A_2/(A_3, \dots, A_n)] \dots P[A_{n-1}/A_n] P[A_n] \tag{II.3}$$

Deux événements sont indépendants si et seulement si:

$$P[A/B] = P[A]$$

C'est-à-dire si et seulement si :

$$P[A \cdot B] = P[A] P[B]$$

1.3. Théorème des Probabilités Totales

On appelle système complet d'événement un ensemble dénombrable d'événements A_i deux à deux incompatibles tels que :

$$P \left[\sum_i^n A_i \right] = \sum_i^n P[A_i] = 1$$

Soit B un événement; le théorème des probabilités totales s'écrit :

$$P[B] = \sum_i P \left[\frac{B}{A_i} \right] P [A_i] \tag{II.4}$$

1.4. Théorème de Bayes:

Etant donné un événement B de probabilité non nulle et A_i un ensemble d'événements complets. On appelle théorème de Bayes la relation suivante :

$$P [A_i/B] = \frac{P \left[\frac{B}{A_i} \right] P [A_i]}{\sum_i P \left[\frac{B}{A_i} \right] P [A_i]} \tag{II.5}$$

Ce théorème s'appelle aussi « théorème sur la probabilité des causes ». En effet, si B est un événement pouvant avoir les causes X ou Y, ce théorème donne la probabilité que l'événement B soit dû à la cause X :

$$P [X/B] = \frac{P [X] P [B/X]}{P [X] P \left[\frac{B}{X} \right] + P [Y] P \left[\frac{B}{Y} \right]} \tag{II.6}$$

2. VARIABLES ALEATOIRES :

2.1. Définition :

Une variable aléatoire est une variable pouvant prendre n'importe quelle valeur d'un ensemble déterminé de valeurs numériques, et à laquelle est associée une loi de probabilité. C'est ainsi, en quelque sorte, une variable qui dépend du hasard.

Soient (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilité et v une application de Ω dans \mathbb{R} . On dit que v est une variable aléatoire si :

$$x \in \mathbb{R}, v^{-1}([-\infty, x]) \in \mathcal{A}$$

Une telle variable peut être continue ou discontinue. Par exemple, la durée de vie d'un composant est une variable aléatoire continue ; la variable aléatoire définie comme étant égale à 0, si un composant A est en fonctionnement, et à 1 s'il est en panne, est une variable aléatoire discontinue.

Une variable aléatoire est caractérisée par sa fonction de répartition et par sa densité de probabilité.

- **Fonction de répartition :** la fonction de répartition d'une variable aléatoire X définie de $-\infty$ à $+\infty$ est la fonction $F(x)$ définie par :

$$F(x) = P[X \leq x]$$

Les propriétés de cette fonction sont les suivantes :

- $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$.
- $\lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = 1$.
- $F(x)$ est non décroissante.
- $0 \leq F(x) \leq 1 \quad \forall x$
- **Densité de probabilité :** lorsque la fonction de répartition $F(x)$ est dérivable, sa dérivée $f(x)$ est la densité de probabilité :

$$f(x) = \frac{dF}{dx}(x)$$

Les propriétés de cette fonction sont les suivants :

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(u)du ; \quad \int_{-\infty}^{+\infty} f(u)du = 1$$

Par ailleurs, on appelle moment d'ordre k de la variable aléatoire X , lorsqu'il existe, le réel défini par :

$$E[X^k] = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k f(x) dx$$

$E[X]$ est l'espérance mathématique ou moyenne.

On appelle variance le réel $V[X]$, lorsqu'il existe, défini par :

$$V[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - E[X])^2 f(x) dx$$

$\sqrt{V[X]}$ est appelé écart type (noté σ) ; d'où $V[X] = \sigma^2[X]$.

2.2. Principales lois de probabilités utilisées :

On distingue habituellement les lois les lois discrètes et les lois continues.

2.2.1. Lois Discrètes :

- Lois binominale :

Soit p la probabilité de réalisation de A . La variable aléatoire discrète X représentant le nombre de réalisation de l'événement A au cours de n expériences et distribuée suivant une loi binominale de paramètres (p, n) telle que :

$$P[X = k] = C_n^k p^k (1 - p)^{n-k} \quad 0 \leq k \leq n ; \quad 0 \leq p \leq 1$$

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

On en déduit la fonction de réparation :

$$F[k] = P[X \leq k] = \sum_{i=0}^k C_n^i p^i (1 - p)^{n-i} \quad (II.7)$$

$$E[X] = np$$

$$V[X] = np(1 - p)$$

A titre d'exemple, on rencontre cette distribution lorsqu'une entité à une probabilité γ de défaillance à la sollicitation. Au bout de n sollicitations, le nombre de défaillances est distribué suivant une loi binominale (γ, n) . Citons deux propriétés de cette loi :

- lorsque $n \rightarrow \infty$ et np reste constant, la loi binominale tend vers une loi de Poisson.
- lorsque $n \rightarrow \infty$ la loi binominale tend vers une loi normale de moyenne $m = np$ et de variance $\sigma^2 = np(1 - p)$

• **Lois de Poisson :**

La loi de Poisson est une loi à un paramètre positif m défini par :

$$P[X = k] = e^{-m} \frac{m^k}{k!}$$

D'où :

$$F[k] = \sum_{i=0}^k e^{-m} \frac{m^i}{i!}$$

$$F[k] = m$$

$$^2[X] = m$$

La loi de Poisson peut être considérée comme le cas limite de la loi binominale lorsqu'on fait tendre n vers l'infini, le produit np restant fini.

La loi de Poisson exprime la probabilité d'apparition d'un nombre k d'événements en un temps donné, lorsqu'à tout instant la probabilité d'occurrence d'un événement est la même. Ainsi, dans ces conditions, le nombre d'incidents relevés en un temps donné sur un important parc d'équipements est une variable aléatoire distribuée suivant une loi de Poisson ; dans ce cas, on a $m = \lambda t$ où λ et t sont respectivement le taux d'apparition de l'événement et t la période d'observation.

2.2.2. Lois Continues :

• **Lois Exponentielle :**

La loi exponentielle est très fréquemment utilisée car elle est une des seuls qui permette de réaliser facilement les calculs.

La densité de probabilité est :

$$f(t) = e^{-\lambda t} \quad \lambda > 0 ; t > 0 \quad \text{(II.8)}$$

Où λ est constante et t le temps.

La fonction de réparation est :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (\text{II.9})$$

Par ailleurs :

$$\text{Moyenne} = \frac{1}{\lambda}; \text{ Variance} = \frac{1}{\lambda^2}$$

Les allures de ces fonctions sont représentées dans le tableau des caractéristiques des principales lois.

La loi exponentielle est très utilisée pour caractériser la période durant laquelle le taux de défaillance est constant ; elle décrit alors l'intervalle de temps entre deux défaillances.

• **Lois Normale :**

La loi normale ou loi de Gauss est une loi à deux paramètres notée $N(m, \sigma)$. Cette loi est symétrique par rapport à la moyenne m ; l'écart type est σ .

La densité de probabilité est :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)^2\right] \begin{cases} - < t < + \\ \sigma > 0 \\ - < m < + \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

La fonction de réparation de réparation est :

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right] dx \quad (\text{II.11})$$

La loi $N(0,1)$ est appelée loi nominale réduite. Si X suit une loi normale $N(m, \sigma)$, $N(X - m)/\sigma$ suit une loi normale réduite.

On rencontre souvent les lois normales à causes des propriétés suivantes :

- Etant donné n variables aléatoires indépendantes X_i de même loi de moyenne m et d'écart type σ finis, la variable aléatoire X_n^i définie par :

$$X_n^i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

tend vers une loi normale $N(m, \frac{\sigma}{\sqrt{n}})$ lorsque n tend vers l'infini (théorème central limite).

- La somme de deux variables aléatoires normales indépendantes $N_1(m_1, \sigma_1)$ et $N_2(m_2, \sigma_2)$ est une variable aléatoire normale $N_1(m_1 + m_2, \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2})$.

Réciproquement, si deux variables aléatoires indépendantes sont telles que leur somme soit normale, elles sont normales.

Les allures de ces fonctions sont représentées dans le tableau des caractéristiques des principales lois.

Cette loi, la plus ancienne utilisée, s'applique à de nombreux phénomènes (incertitude sur des mesures, des fabrications, etc.).

- **Loi Log-normale :**

Une variable aléatoire est distribuée suivant une loi log-normale si son logarithme est distribué suivant une loi normale.

La densité de probabilité est :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log t - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \begin{cases} t > 0 \\ \sigma > 0 \end{cases} \quad \text{(II.12)}$$

La fonction de réparation est :

$$F(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log x - \mu}{\sigma}\right)^2\right] dx \quad \text{(II.13)}$$

Par ailleurs :

$$\text{Moyenne} = \exp\left[\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right]; \quad \text{Variance} = e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)$$

Il est important de noter que si X_1 et X_2 suivent de manière indépendante des lois log-normale, $Y = X_1 \cdot X_2$ suit une loi log-normale.

Les allures de ces fonctions sont représentées dans le tableau des caractéristiques des principales lois.

Cette loi est souvent utilisée pour représenter les durées de réparations des composants ou les incertitudes dans la connaissance d'une donnée de sûreté de fonctionnement.

Donnons quelques propriétés de cette loi, très utiles dans le dernier cas d'utilisation. Considérons l'intervalle de confiance $[X_{0,05}, X_{0,95}]$ associé à un niveau de confiance de 0,9 :

$$X_{0,05} = \exp [\mu - 1,645 \sigma]$$

$$X_{0,95} = \exp [\mu + 1,645 \sigma]$$

$$X_{0,50} = \text{Médiane} = \sqrt{X_{0,05} X_{0,95}} = e^\mu$$

La connaissance de l'intervalle de confiance permet d'en déduire les paramètres de la loi log-normale. Notons que le facteur d'erreur (FE) est défini de la manière suivante :

$$FE = \sqrt{\frac{X_{0,95}}{X_{0,05}}} = e^{1,645 \sigma}$$

D'où :

$$X_{0,95} = X_{0,50} FE ; \quad X_{0,05} = \frac{X_{0,50}}{FE}$$

- **Loi de Weibull :**

Cette loi dépend de trois paramètres. Elle est très intéressante car elle permet de représenter un grand nombre de distributions expérimentales.

La densité de probabilité est :

$$f(t) = \frac{\beta (1-\gamma)^{\beta-1}}{\sigma^\beta} \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\sigma} \right)^\beta \right] \begin{cases} \beta > 0 \\ \sigma > 0 \\ t > \gamma \end{cases} \quad \text{(II.14)}$$

La fonction de réparation est :

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\sigma} \right)^\beta \right] \quad \text{(II.15)}$$

Par ailleurs :

$$\text{Moyenne} = \gamma + \sigma \Gamma\left(\frac{1+\beta}{\beta}\right) \text{ (voir la loi gamma)}$$

$$\text{Variance} = \sigma^2 \left[\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]$$

La loi exponentielle est une loi de Weibull dont les paramètres sont égaux à :

$$\beta = 0, \gamma = 0, \sigma = \frac{1}{\lambda}$$

Les allures de ces fonctions sont représentées dans le tableau.II.1 des caractéristiques des principales lois de la Sûreté de Fonctionnement.

3. RELATIONS FONDAMENTALES DANS LE DOMAINE DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT :

3.1. Définitions et principales caractéristiques :

- **Fiabilité d'une entité E :**

- $R(t) = P [E \text{ non Défaillante sur } [0, t]]$; on admet que l'entité est en fonctionnement au temps $t = 0$
- L'expression $1 - R(t)$ est la Défiabilité et sera notée $\bar{R}(t)$ [Fonction de Réparation].
- $R(t)$ est une fonction non croissante variant de 1 à 0 sur $]0, +\infty [$

- **Disponibilité d'une entité E :**

- $R(t) = P [E \text{ non Défaillante sur } [0, t]]$.
- L'expression $1 - A(t)$ est l'indisponibilité et sera notée $\bar{A}(t)$
- Dans le cas d'une entité irréparable : $A(t) = R(t)$
- Dans le cas général (entité réparable, par exemple), on a la relation suivante :

$$A(t) \geq R(t)$$

En effet, une entité contribue à la disponibilité $A(t)$ mais non à la $R(t)$ si l'entité tombe en panne avant le temps t puis est réparée pour être disponible au temps t .

- **Maintenabilité d'une entité E :**

- $M(t) = 1 - P [E \text{ non réparée sur } [0, t]]$

- L'expression $1 - M(t)$ est l'immaintenabilité et sera notée $\bar{M}(t)$
- $M(t)$ est une fonction non décroissante variant de 0 à 1 sur $[0, +\infty [$
- $\lim_{t \rightarrow +\infty} M(t) = 1$.

3.2. La Sûreté de Fonctionnement et les Principales Loix de Probabilités :

3.2.1. Densité de défaillance et de réparation, MTTF et MTTR :

Soit T la variable aléatoire mesurant la durée de fonctionnement de l'entité :

$$R(t) = P[T > t] \tag{II.16}$$

La fonction de réparation de la variable aléatoire T s'écrit :

$$F(t) = P[T \leq t] = 1 - R(t) = \bar{R}(t)$$

La défiabilité est ainsi égale à la fonction de réparation de la variable aléatoire T.

La densité de défaillance $U(t)$ s'écrit :

$$U(t) = \frac{dF}{dt}(t) = \frac{d\bar{R}}{dt}(dt) = -\frac{dR}{dt}(t)$$

Ainsi, $U(t)dt$ est la probabilité que la première défaillance de l'entité survienne durant le petit intervalle de temps $[t, t + dt]$, sachant que l'entité est en fonctionnement au temps $t = 0$.

On en déduit le MTTF :

$$MTTF = \int_0^{\infty} tU(t)dt$$

D'où :

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \frac{dR(t)}{dt}(t)dt$$

On montre, en intégrant par partie, que :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt - [tR(t)]_0^{\infty}$$

Supposons que le MTTF est défini ; $tR(t)$ tend vers zéro quand t tend vers l'infini.
D'où :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \tag{II.17}$$

De la même manière, on définit la densité de réparation $G(t)dt$ est la probabilité que la réparation soit achevée durant l'intervalle de temps $[t, t + dt]$ sachant que l'entité est défaillante au temps $t = 0$.

On en déduit le MTTR :

$$MTTR = \int_0^{\infty} tG(t)dt$$

On montre, en intégrant par partie, que :

$$MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)]dt \tag{II.18}$$

3.2.2. Taux de défaillance et de réparation :

- **Taux de défaillance (instantané) :**

C'est la limite, si elle existe, du quotient de la probabilité conditionnelle pour que l'instant T d'une défaillance d'une entité soit compris dans un intervalle de temps donné $[t, t + dt]$, par la durée de l'intervalle de temps, lorsque Δt tend vers zéro en supposant que l'entité n'a pas eu de défaillance sur $[0, t]$.

$$\lambda(t) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} P[E \text{ est défaillante entre } t \text{ et } [t + \Delta t] \text{ sachant qu'elle n'a pas eu de défaillance sur } [0, t]]$$

Il en résulte en utilisant le théorème des probabilités conditionnelles :

$$\lambda(t) = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} \frac{P[E \text{ est défaillante entre } t \text{ et } t + \Delta t \text{ sachant qu'elle n'a pas eu de défaillance sur } [0, t]]}{P[E \text{ non défaillante sur } [0, t]]}$$

D'où :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{1}{R(t)} (P [E \text{ est défaillante sur } [0, t + \Delta t]] - P[E \text{ est défaillante sur } [0, t]])$$

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t R(t)}$$

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-\frac{dR}{dt}(t)}{R(t)} \geq 0 \tag{II.19}$$

Ce taux de défaillance est aussi appelé « taux de défaillance instantané ».

- **Taux de réparation (instantané) :**

C'est la limite, si elle existe, du quotient de la probabilité conditionnelle pour que l'instant T d'achèvement de la réparation d'une entité soit compris dans un intervalle de temps donné $[t, t + dt]$, par la durée de l'intervalle de temps, lorsque Δt tend vers zéro, en supposant que l'entité a été en panne sur $[0, t]$.

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} (P [E \text{ est réparée entre } t \text{ et } [t + \Delta t] \text{ sachant qu'elle a été en panne sur } [0, t]])$$

Précisons que l'entité est ainsi supposée défaillante au temps $t = 0$ et en panne jusqu'au temps t .

On montre, en utilisant le théorème des probabilités conditionnelles, que :

$$\mu(t) = \frac{\frac{dM}{dt}(t)}{1-M(t)} \geq 0 \tag{II.20}$$

Ce taux de réparation est aussi appelé « taux de réparation instantané ».

3.2.3. Taux de Défaillance et MTTF

Le tableau des caractéristiques des principales lois donne des lois fréquemment utilisées en sûreté de fonctionnement (lois exponentielle, normale, log-normale, de Weibull) les expressions et les allures :

- De la densité de défaillance $U(t)$.
- De la défiabilité $\bar{R}(t)$.
- De taux de défaillance $\lambda(t)$.

Le MTTF est également indiqué pour chaque loi. On rappelle que ces lois sont relatives à la variable aléatoire T mesurant la durée de fonctionnement de l'entité.

Ces lois appellent les commentaires suivants :

- La loi exponentielle est très souvent utilisée dans les calculs car ceux-ci s'en trouvent grandement simplifiés. Cependant, cette loi ne décrit ni le cas de composants jeunes (défaillances précoces) dont le taux de défaillance diminue dans le temps, ni le cas de composants vieux dont le taux de défaillance augmente dans le temps (dû à l'usure).

Avec cette loi on obtient :

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

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda}$$

De même, si l'on suppose que le taux de réparation $\mu(t)$ est une constante M , on en déduit :

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

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

Loi Aléatoire	Application à la Fiabilité	Loi Exponentielle	Loi Normale	Loi Log-Normale	Loi de Weibull
Densité de Probabilité f(t)	Densité de Défaillance U(t)	$\lambda \exp^{-\lambda t}$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$	$\frac{1}{\sigma t\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\log t - \mu}{\sigma}\right)^2\right]$	$\frac{\beta}{\sigma} \left(\frac{t-\gamma}{\sigma}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\sigma}\right)^\beta\right]$
Fonction de Répartition F(t)	Défiabilité $\bar{R}(t)$	$1 - \exp^{-\lambda t}$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dx$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\log x - \mu}{\sigma}\right)^2\right] dx$	$1 - \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\sigma}\right)^\beta\right]$
-	Taux de Défaillance $\lambda(t)$	λ	$\frac{U(t)}{R(t)}$	$\frac{U(t)}{R(t)}$	$\frac{\beta}{\sigma} \left(\frac{t-\gamma}{\sigma}\right)^{\beta-1}$
Moyenne	MTBF	$\frac{1}{\lambda}$	μ	$\exp\left[\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right]$	$\gamma + \sigma \Gamma\left(\frac{1+\beta}{\beta}\right)$
Variance		$\frac{1}{\lambda^2}$	σ	$e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)$	$\sigma^2 \left[\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]$

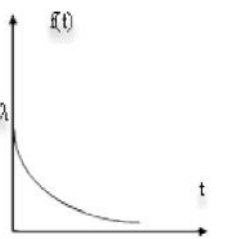
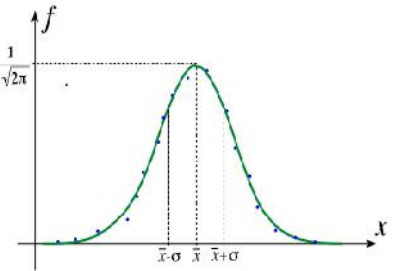
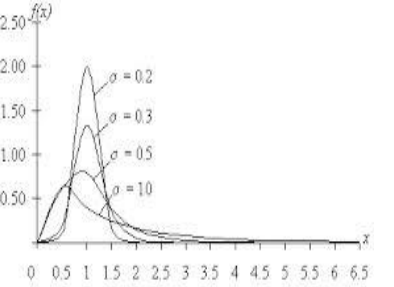
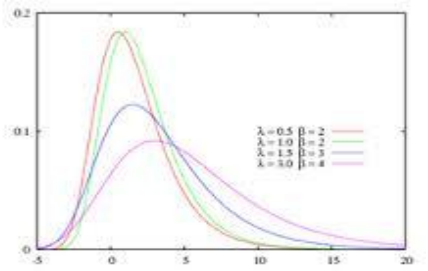
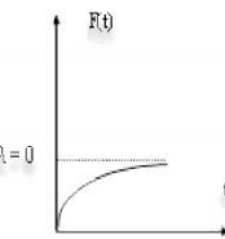
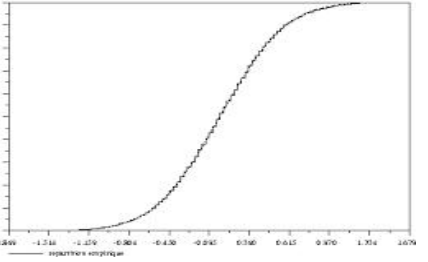
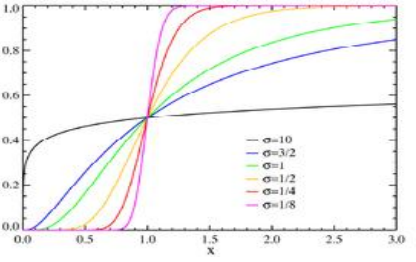
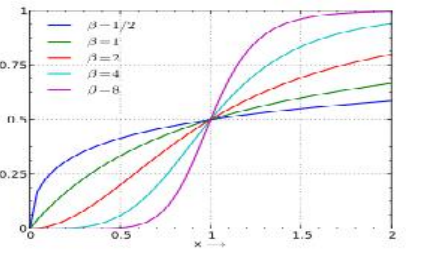
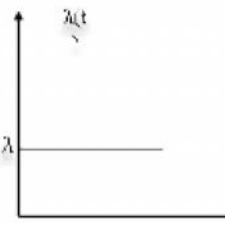
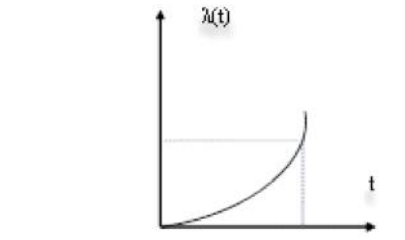
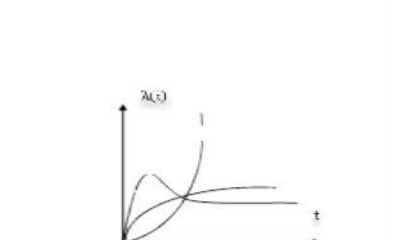
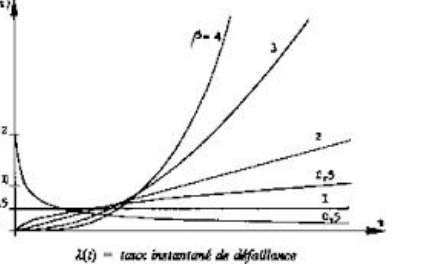
<p>$f(t) = U(t)$</p>				
<p>$F(t) = \bar{R}(t)$</p>				
<p>$\lambda(t)$</p>				

Tableau.II.1. Principaux Caractéristique des Principales Loix de la Sûreté de Fonctionnement.

On note généralement τ la durée moyenne de réparation ($= \frac{1}{\mu}$).

- La loi normale convient à des composants usés dont le taux de défaillance augmente avec le temps.
- La loi de Weibull a les caractéristiques suivantes :
 - $\beta < 1$: le taux de défaillance est décroissant avec le temps.
 - $\beta > 1$: le taux de défaillance est croissant avec le temps.

Cette loi correspond généralement bien aux composants mécaniques pour lesquels les taux de défaillance sont rarement constants.

3.2.4. Fiabilité et Disponibilité :

On distingue généralement trois classes d'entités :

- L'entité est irréparable.
- L'entité réparable : la réparation est entreprise lorsque l'on détecte la panne et l'entité est, à la fin de la réparation, remise en service en étant aussi « neuve » qu'avant.
- L'entité est en attente et est périodiquement testée : on admet que l'entité est à l'arrêt et qu'un test est périodiquement effectué (démarrage de l'entité).

On évalue la fiabilité et la disponibilité de ces entités. Dans un souci de simplification, nous admettons que les taux de défaillance et de réparation constants.

- **L'Entité est Irréparable :**

Sa disponibilité $A(t)$ est égale à sa fiabilité $R(t)$. On a précédemment vu :

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

- **L'Entité est Réparable :**

Le théorème des probabilités totales permet d'écrire : $A(t + dt) =$

P [entité en fonctionnement à t et n'a pas de défaillance entre t et $t + \Delta t$] +
 P [entité en panne à t et est réparée entre t et $t + \Delta t$]

On suppose que les taux de défaillance et de réparation sont constants :

$$A(t + dt) = A(t)(1 - \lambda \Delta t) + (1 - A(t))\mu \Delta t$$

$$\frac{dA}{dt}(t) = \mu - (\lambda + \mu)A(t)$$

La résolution peut éventuellement se faire en utilisant la transformation de Laplace.

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\mu(1-A(0)) - \lambda \cdot A(0)}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \tag{II.21}$$

Supposons que l'entité était disponible à $t=0$ ($A(0) = 1$)

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

Nous obtenons la courbe de figure suivante :

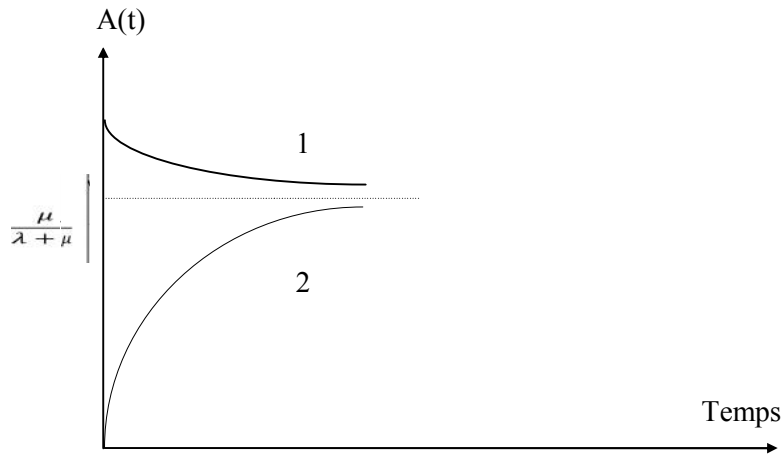


Figure.II.1. Disponibilité d'une Entité.

Il est intéressant de noter que :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = A(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \tag{II.22}$$

$$\bar{A}(\infty) = 1 - A(\infty) = \frac{MTTR}{MTTF + MTTR} \approx \frac{\lambda}{\mu} \tag{II.23}$$

Ainsi :

- La disponibilité asymptotique est égale à la proportion du temps pendant lequel l'entité est en état de fonctionner.
- L'indisponibilité asymptotique est égale à la proportion du temps pendant lequel l'entité n'est pas en état de fonctionner.

Types de valeurs	Composant irréparable	Composant réparable
Valeurs instantanées liées à la sûreté de fonctionnement	$A(t) = \frac{1}{\lambda}$	$A(t) = \frac{1}{\lambda}$
	$A = \frac{1}{\lambda}$	$A = \frac{1}{\lambda}$
	$U(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	$U(t) = \lambda e^{-\lambda t}$
	$R(t) = e^{-\lambda t}$	$R(t) = e^{-\lambda t}$
	$MTTF = \frac{1}{\lambda}$	$MTTF = \frac{1}{\lambda}$
	$M(t) = 0$	$M(t) = \mu$
	$G(t) = 0$	$G(t) = \mu e^{-\mu t}$
	$M(t) = 0$	$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$
	$MTTR =$	$MTTR = \frac{1}{\mu}$
	$A(t) = R(t) = e^{-\lambda t}$	$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}$
$\bar{A}(t) = 1 - e^{-\lambda t}$	$\bar{A}(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} [1 - e^{-(\lambda + \mu)t}]$	
Valeurs limites liées à la sûreté de fonctionnement	$A(\infty) = 0$	$A(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$
	$\bar{A}(\infty) = 1$	$\bar{A}(\infty) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{MTTR}{MTTF + MTTR}$

Tableau.II.2. Principales Caractéristiques de la Sûreté de Fonctionnement.

4. EXEMPLES ET APPLICATIONS

4.1. Calcul des fonctions $F(t)$, $R(t)$, $\lambda(t)$:

Dans une entreprise de production et après douze mois d’observation sur les équipements de l’usine, le nombre de matériels en test au départ est de 200. A chaque fin de période d’un mois, le nombre de défectueux est enregistré, on obtient ainsi le nombre de survivants ce qui nous permet le calcul de différentes fonctions comme [1]:

T (mois)	Nombre de défaillances	$\sum n(t)$	$f(t) = \frac{n(t)}{N}$	$F(t) = \frac{\sum n(t)}{N}$	$R(t) = 1 - F(t)$
1	1	1	$1/200 = 0,005$	0,005	0,995
2	2	3	$2/200 = 0,01$	0,015	0,985
3	4	7	$4/200 = 0,02$	0,035	0,965
4	7	14	0,035	0,07	0,93
5	8	22	0,04	0,11	0,89
6	14	36	0,07	0,18	0,82
7	18	54	0,09	0,27	0,73
8	63	117	0,315	0,585	0,415
9	43	160	0,215	0,8	0,2
10	25	185	0,125	0,925	0,075
11	10	195	0,05	0,975	0,025
12	5	N = 200	0,025	1	0

Tableau.II.3. Calcul des Fonctions $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ et $\lambda(t)$.

4.2. Représentations des fonctions $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ et $\lambda(t)$:

4.2.1. Densité de Probabilité $f(t)$:

On obtient les valeurs de la densité de probabilité des défaillances $f(t)$ pour chaque période (t).

L’intérêt de cette fonction est de voir comment se distribuent les défaillances autour de la moyenne de tenue du matériel.

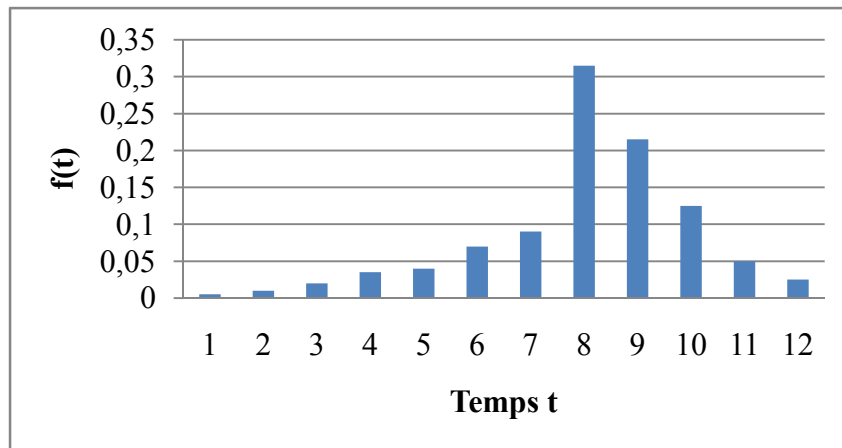


Figure.II.2. Courbe de la Densité de Probabilité de Défaillance $f(t)$.

- **La densité de probabilité $f(t)$** : représente la probabilité de la défaillance dans l'intervalle $[0, t]$. L'intérêt de cette fonction est de voir comme se distribue les défaillances dans un intervalle de temps.

4.2.2. Fonction de Répartition $F(t)$:

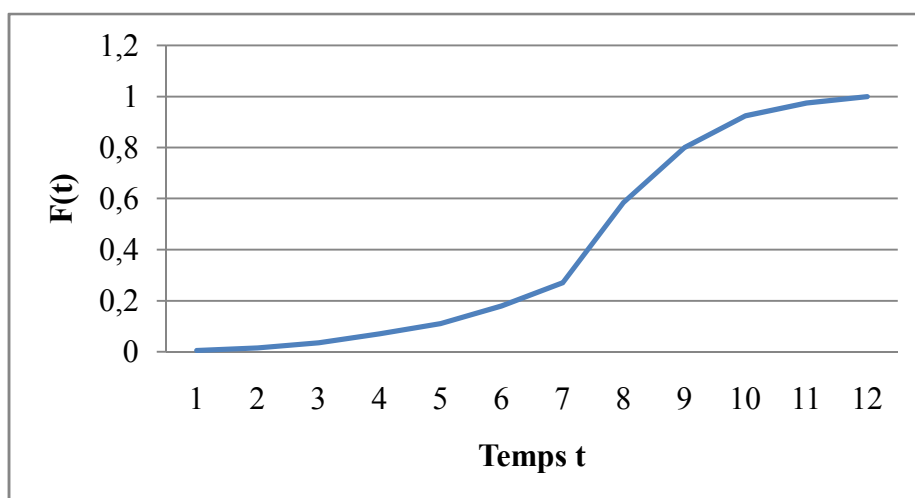


Figure.II.3. Courbe Représentative de la Fonction $F(t)$.

- **La fonction de répartition $F(t)$** : la fonction de répartition des défaillances $F(t)$ d'un composant entre les instants t et $(t + dt)$. On constate que les défaillances augmentent avec le temps.

Le nombre de matériels défaillants est donné pour chaque période t de valeur égale à un mois.

4.2.3. Fonction de fiabilité $R(t)$:

- **La fonction de fiabilité $R(t)$** :représente la probabilité de non défaillance dans l'intervalle de temps de $[0, t]$, c'est-à-dire la probabilité de défaillance au-delà du temps t . Après douze mois, tous les appareils sont défectueux.

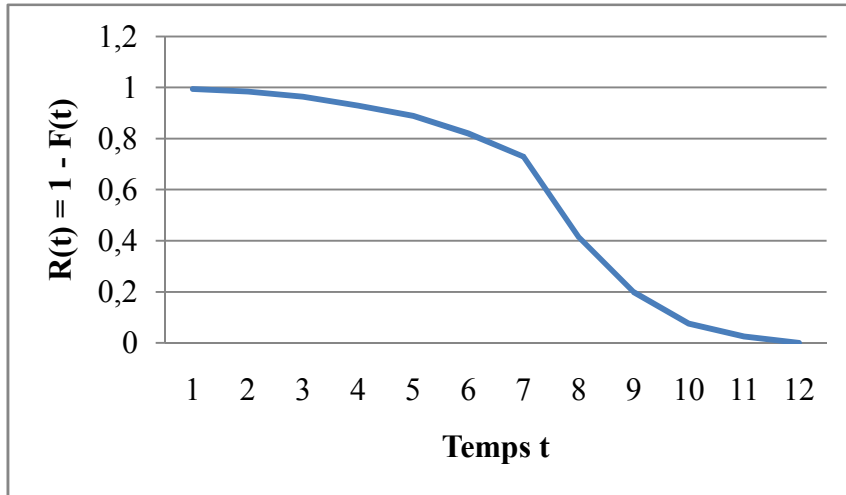


Figure.II.4. Courbe de la Fonction de Fiabilité $R(t)$.

4.2.4. Taux de Défaillance $\lambda(t)$:

- **Le taux de défaillance $\lambda(t)$** : représente la probabilité de défaillance à $t + \Delta t$ donc le système est encore en bon fonctionnement à t .

Le nombre de matériels en test au départ est de 200. A chaque fin de période d'un mois, le nombre de matériels défectueux est enregistré, on obtient ainsi le nombre de survivants.

Le tableau suivant représente la façon avec laquelle nous avons calculé le taux de défaillance $\lambda(t)$:

T (mois)	Nombre de défaillances n(t)	Nombre de survivants N(t)	$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N(t)}$
1	1	200	0,005
2	2	199	0,010
3	4	197	0,020
4	7	193	0,036
5	8	186	0,043
6	14	178	0,079
7	18	164	0,110
8	63	146	0,432
9	43	83	0,518
10	25	40	0,625
11	10	15	0,667
12	5	5	1

Tableau.II.4. Calcul du Taux de Défaillance $\lambda(t)$.

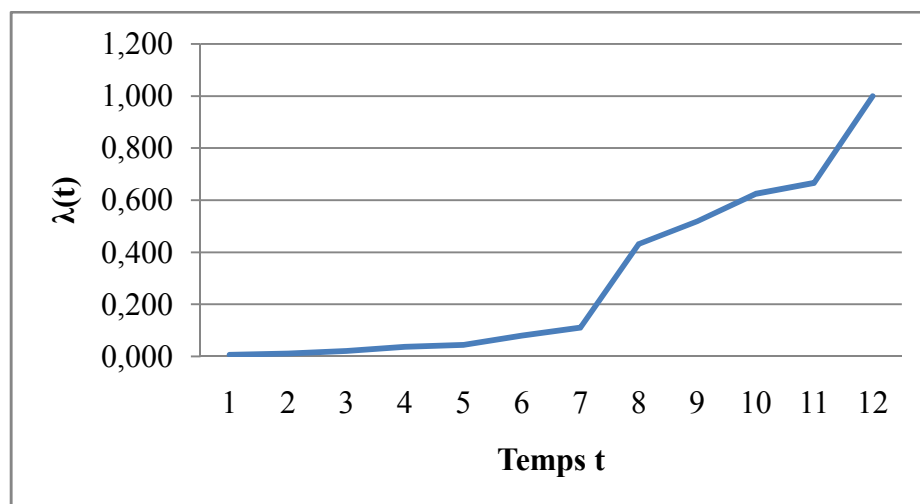


Figure.II.5. Courbe du Taux de Défaillance $\lambda(t)$.

5. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents concepts mathématiques, les lois probabilistes et leurs méthodes de calcul pour la détermination des fonctions de la sûreté de fonctionnement. Notre travail sera basé sur l'utilisation des lois continues pour le calcul de la fiabilité des équipements industriels en utilisant le cas pratique d'une Station d'Épuration de la Ville de Timgad.

CHAPITRE III

PRESENTATION DE L'ENREPRISE

1. PRESENTATION GENERALE

1.1. Office National de l'Assainissement -ONA-

Placé sous la tutelle du Ministère des Ressources en Eau, l'Office National de l'Assainissement «ONA » est un établissement public national, à caractère Industriel et Commercial, crée par décret exécutif n01-102 du 21 Avril 2001.

- **Mission :**

Chargé de l'exploitation et de la maintenance des ouvrages et infrastructure d'assainissement, l'ONA assure :

- a) La protection et la sauvegarde des ressources et de l'environnement hydrique.
- b) La lutte contre toutes les sources de pollution hydrique ainsi que la gestion, l'exploitation, la maintenance, le renouvellement, l'extension et la construction de tout ouvrage destiné à l'assainissement.
- c) La valorisation et la commercialisation des sous-produits des eaux usées épurées.
- d) La préservation de la santé publique.

L'ONA assure également pour le compte de l'Etat la maîtrise d'ouvrage déléguée concernant les projets d'études, de réalisation, de réhabilitation, de diagnostics de Stations d'Épuration, de Réseaux d'Assainissement ainsi que des Stations de Relevage.

- **Organisation :**

L'ONA est doté d'un Conseil d'Orientation et de Surveillance, d'une Direction Générale, de douze (12) zones, de deux (02) Directions Assainissement et de 43 unités sur le territoire national.

L'ONA prend en charge :

- a) **19854 Km** de Réseau sur **31854 Km** du Réseau National.
- b) **591** Communes sur **1541** existantes.
- c) **32** Stations d'épuration et **20** Lagunes d'une capacité totale de **3,5 millions Eq/h**, soit un volume total traité de **600000M3/j**.
- d) **175** Station de relevage d'un volume relevé équivalent à **86 million M3/an**.

- **Un laboratoire Central au service de l'environnement :**

Doté de fortes compétence humaines et d'équipements modernes et performants, le laboratoire central de l'ONA :

- a) Le suivi et le contrôle du processus des stations d'épuration
- b) L'assistance technique aux laboratoires des stations d'épuration.
- c) Les études de valorisation des eaux épurées et des boues.
- d) La prestation de service au profit des tiers.

- **Une certification méritée dans le management de l'environnement :**

L'ONA s'est engagé dans une démarche de management de l'environnement selon la norme internationale ISO 14001 version 2004.

Cette démarche volontaire a été couronnée par une certification du siège de la Zone d'Alger, du Laboratoire Central, du Système d'Assainissement Est de la Ville de Tizi-Ouzou et du Système d'Assainissement de CHENOUA Wilaya de TIPAZA.

Cette distinction demeure la première à l'échelle nationale et Africaine dans le domaine de la gestion et de l'exploitation des systèmes d'assainissement.

- **CFMA, Un centre de formation dédié aux métiers de l'assainissement :**

Le CFMA est le premier Centre de Formation aux Métiers de l'Assainissement en Algérie, il dispense des formations adaptées pour l'acquisition des connaissances dans la gestion, l'exploitation et la maintenance des systèmes d'assainissement comme :

- a) Connaissance du réseau d'assainissement (Cartographie).
- b) Visite, auscultation et curage du réseau d'assainissement.
- c) Exploitation des stations d'épuration (règles de base et normes du métier).
- d) Maintenance électromécanique des équipements des stations d'épuration et stations de relevage.
- e) Analyse de base en épuration, contrôle de la conformité des rejets.

- **Grands Travaux :**

- a) Lutte contre la remontée des eaux d'Oued Souf et Ouargla.
- b) Protection du barrage de Beni Haroun :
 - Réalisation de 05 stations d'épuration (Mila, Ferdjioua, Zeghaia, Rouached, Bougherdane).
 - 08 stations de pompage et relevage.
- c) Autres projet : Réalisation et extension des stations d'épuration dans toutes les zones du pays.

Des études de diagnostic et de réhabilitation du système d'assainissement, et extension de 08 stations d'épuration.

- **Présentation de la zone de Batna :**

La zone de Batna dont le siège est fixé à Batna, regroupe quatre (04) unités, réparties à travers les Wilayates ci-après : Batna, Oum-El Bouaghi, Biskra, Khenchela.

Cette zone est chargée de gérer des infrastructures d'assainissement, les stations d'épuration (Batna, Timgad, Khenchela) et la réalisation dans le cadre maîtrise d'ouvrage déléguée dans projet de réalisation et d'extension de stations épuration.

2. STATION D'EPURATION -STEP-

Le traitement des eaux usées constitue le premier enjeu de santé publique; les eaux usées sont toutes les eaux chargées de différents éléments provenant de la population mais aussi des activités commerciales et industrielles du fait qu'elles ont été utilisées pour le lavage ou les toilettes, qui sont de nature à polluer les milieux dans lesquelles elles seront déversées.

C'est pourquoi, dans un souci de respect de ces différents milieux, des traitements sont réalisés sur ces effluents par le réseau d'assainissement urbain.

2.1. Qu'est-ce qu'une Station d'Épuration ?

Une station d'épuration est une usine de dépollution des eaux usées avant leur rejet au milieu naturel, dans un Barrage, un Rivière, un Oued ou la Mer en général.

Les eaux résiduaires sont collectées dans les réseaux d'assainissement (égouts et collecteurs) qui permettent leur écoulement jusqu'à la station d'épuration.

Les égouts peuvent être de type unitaire ou séparatif. Dans le premier cas, le plus souvent rencontré, les eaux usées et les eaux de pluie sont collectées dans une même conduite. Dans le type séparatif, elles sont collectées dans deux tuyaux distincts, l'un évacuant les eaux claires (dites eaux de ruissellement) et l'autre transportant les eaux usées.

2.2. Que Traite une Station d'Épuration ?

Les eaux résiduaires admises sur une station d'épuration comprennent généralement:

- **Les eaux ménagères:** provenant des cuisines et du lavage, contenant essentiellement des matières organiques (graisse, protéines,) et des produits chimiques (produits d'entretien, détergents,...).
- **Les eaux-vannes:** provenant des sanitaires et contenant des matières organiques biodégradables et des micro-organismes.
- **Les eaux pluviales:** lorsque le réseau d'assainissement est de type unitaire, qui véhiculent des matières végétales (feuilles, branches, ...) ou minérales (sables,...)
- **Les eaux résiduaires industrielles:** dont la nature est compatible avec le traitement assuré par la station d'épuration.

3. PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE

Timgad est une ville du Nord-est de l'Algérie, située dans la wilaya de Batna elle est située à la périphérie de la ville antique de Timgad, à **35 km** à l'est du chef-lieu de la wilaya de Batna et à **68 km** à l'ouest du chef-lieu de la wilaya de Khenchela.



Figure.III.1. Photo Représentant la Localisation de la STEP de la Ville de Timgad

3.1. Situation géographique

Timgad est située à l'est du chef-lieu de la wilaya de Batna à une distance de **35 km**, elle est limitée administrativement par :

- La commune de Chemora au nord.
- La commune de Fometoub au sud.
- La commune d'Oued Taga au sud-ouest.
- La commune d'Ouyoun Ellassafir à l'ouest.
- La commune d'Ouled Fadel à l'est.

3.2. Situation Démographique :

Le nombre d'habitation du centre Timgad est estimé suivant le dernier **RGPH 2008** à **9511 habitants** (centre Timgad : **8720** et ferme pilot **791**).

Réseau d'assainissement :

- La ville de Timgad est assainie presque totalement, le taux de couverture de réseau dépasse **90%**.
- La longueur totale du réseau est **27205 ml**.

4. PRESENTATION DU SYSTEME D'ETUDE

4.1. Station d'Épuration des Eaux Usées (STEP de Timgad)

4.1.1. Historique de la STEP de Timgad

L'étude de réalisation d'une station d'épuration au niveau de la ville de Timgad a été achevée vers fin de l'année 2006. la réalisation effective du projet était entamée durant l'année 2007 par l'entreprise allemande PASSAVANT RODRIGER.

- La mise en marche de la STEP a été assurée le 21 juillet 2009,
- La réception provisoire était en 21 Septembre 2011.
- La réception définitive était prononcée le 21 Septembre 2013.

4.1.2. Impacte de la Station d'Épuration

La réalisation de la station d'épuration de la ville de Timgad est destinée à épurer les eaux usées d'une population rejetées juste en amont du barrage Koudiat Medouar en vue de pallier aux problèmes de pollution du milieu récepteur. L'objectif essentiel de cette station est de protéger le barrage de Koudiat Medouar contre le phénomène de pollution, sachant que ce Barrage est destiné à l'alimentation d'eau potable des wilayas de Batna et Khenchela et l'irrigation des périmètres de Chemora, Batna et Ain Touta.

4.1.3. Caractéristiques de la STEP de Timgad

A l'entrée de la STEP les eaux usées résiduelles sont caractérisées par une charge telle que donnée en Annexe I.

A la sortie de la STEP, l'effluent aura des concentrations en charges polluants nettement inférieur, sauf par le NO_3 qui augmente à cause de la nitrification mais reste dans l'énormes.

4.2. Description des Différents Ouvrages de la STEP de Timgad

La station d'épuration des eaux usées résiduaires de la ville de Timgad rassemble une succession de dispositifs, empruntés tour à tour par les eaux usées. Chaque dispositif est conçu pour extraire au fur et à mesure les différents polluants contenus dans les eaux.

Dans le concept général du processus de traitement, les éléments de la station d'épuration de Timgad utilisés forment la chaîne de traitement suivant les deux figures suivantes :



Figure.III.2. Photo Représentant la Plan de la STEP de la Ville de Timgad

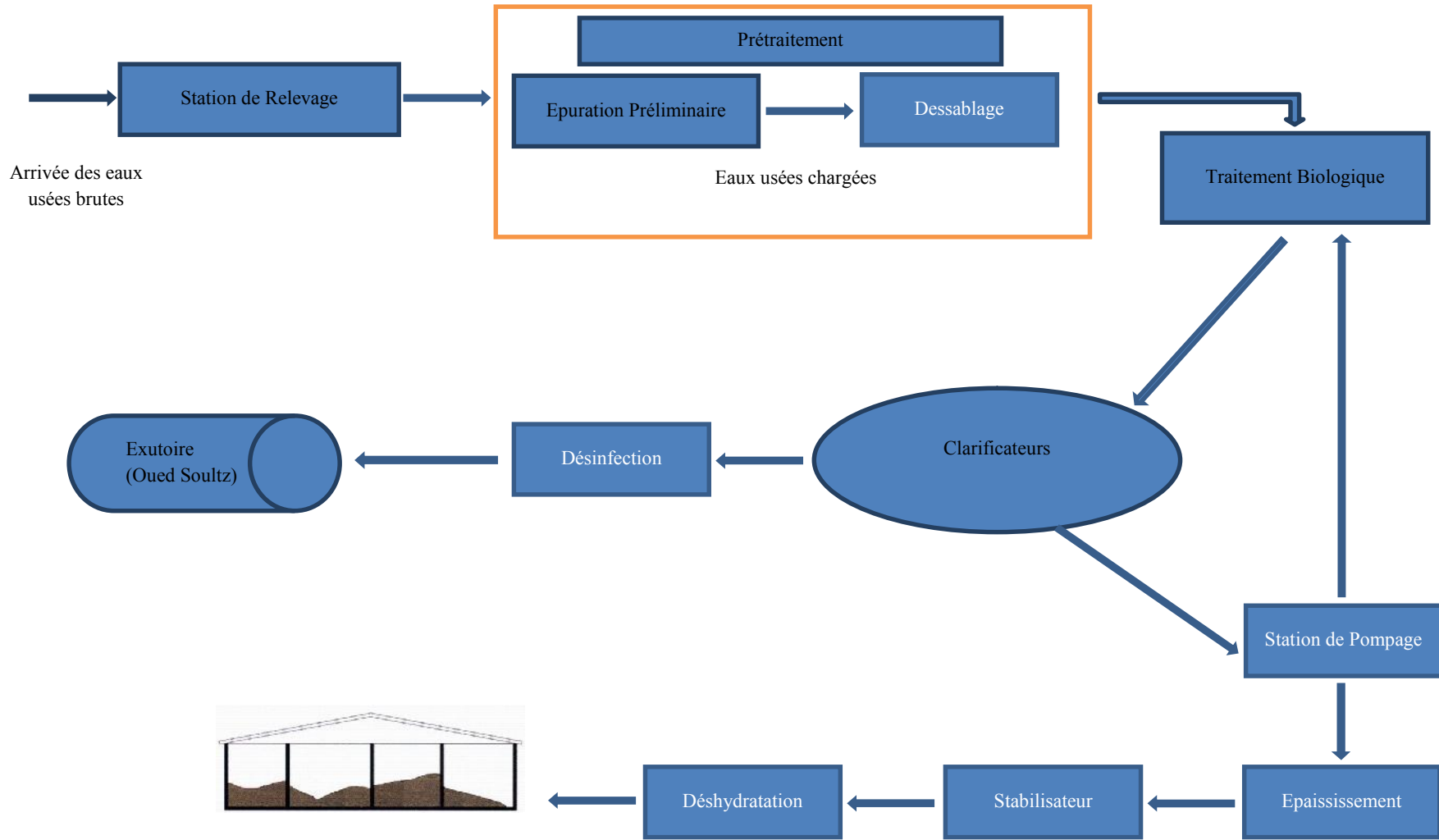


Figure.III.3. Schéma représentant le fonctionnement de la STEP de la ville de Timgad.

5. FONCTIONNEMENT DE LA STATION D'EPURATION

La plupart des stations d'épuration fonctionnent selon les mêmes processus de base, mais des différences plus ou moins importantes peuvent exister dans la manière de mettre en place ces processus. Le traitement se divise généralement en plusieurs étapes (Prétraitement, Traitement primaire, secondaire, tertiaire, quaternaire).

Le fonctionnement des Stations d'Épuration se fait en plusieurs phases différentes comme suit :

- **Station de Relevage :**

Les eaux usées arrivent dans un collecteur à la station de relevage qui seront relevées directement à la l'entrée de la station d'épuration de la ville de Timgad grâce à des pompes submersibles pour eaux chargées.

- **Prétraitement :**

Cette étape consiste en trois étapes principales qui permettent de supprimer de l'eau les éléments qui gêneraient les phases suivantes de traitement. Toutes les stations d'épuration ne sont pas forcément équipées des trois, seul le dégrillage est généralisé, les autres sont le dessablage et le déshuilage. Des pompes élèvent les effluents de quelques mètres afin de permettre le transfert entre les différents bassins par gravité, et qui vont passer par le :

- **Dégrilleur :** A l'aide d'un peigne retire tous les éléments solides de taille supérieure à un gabarit (pierres, plastique, ...). En effet, ces déchets ne pouvant pas être éliminés par un traitement biologique ou physico-chimique, il faut donc les éliminer mécaniquement. Celles-ci sont en général équipées de systèmes automatiques de nettoyage pour éviter leur colmatage, et aussi pour éviter le dysfonctionnement de la pompe.
- **Dessablage:** Le sable accumulé en fond du bassin est aspiré. Ce matériau, s'il n'était pas enlevé, se déposerait plus loin, gênant le fonctionnement de la station et provoquant une usure plus rapide des éléments mécaniques comme les pompes. Les sables extraits peuvent être lavés avant d'être mis en décharge, afin de limiter

le pourcentage de matières organiques, la dégradation de celles-ci provoquant des odeurs et une instabilité mécanique du matériau.

- **Déshuilage** : Une raclette récupère les graisses en surface du bassin, c'est généralement le principe de la flottation qui est utilisé pour l'élimination des huiles. Son principe est basé sur l'injection de fines bulles d'air dans le bassin de déshuilage, permettant de faire remonter rapidement les graisses en surface (ces fines bulles d'air sont injectées par des diffuseurs en général équipés par un système automatique avec un oxymètre pour calculer le débit d'oxygénation).



Figure.III.4. Photos représentant l'Etape du Dessablage et Déshuilage de l'Ouvrage Prétraitement.

- **Bassin Biologique :**

Les eaux dessablées et déshuilées arrivent, en provenance du prétraitement vers le bassin biologique, le mélange eaux usées/boues est fait dans une zone de contact du bassin biologique. L'étage d'épuration biologique constitue de :

- D'un bassin d'anaérobie dimensionné pour une élimination biologique du phosphore.
- Deux lignes des bassins biologiques aérés (bassin aérobie et anoxique).



Figure.III.5. Photos Représentant l'Ouvrage du Bassin Biologique.

- **Clarificateur (Décanteur) :**

Les boues activées issues de l'ouvrage biologique sont dirigées vers les clarificateurs circulaires à l'intérieur desquels les boues vont décanter en fond de ces derniers d'où elles seront raclées et retirées.

L'évacuation des eaux épurées est réalisée par une goulotte circulaire en béton sur tout le périmètre des clarificateurs. Les eaux clarifiées se déversent dans cette goulotte au moyen d'une lame crantée réglable en hauteur.



Figure.III.6. Photo Représentant l'Ouvrage de la Clarification.

- **Désinfection :**

La désinfection n'a de sens que si l'eau est préalablement bien épurée et clarifiée. Il existe plusieurs moyens pour désinfecter les eaux usées, la chloration, l'ozonation, le rayonnement ultraviolet et le langage. Dans la STEP de Timgad la méthode utilisée pour la désinfection est la chloration. La chloration est préparé avec une concentration de : $42\text{g}/\text{m}^3$.

Dosage spécifique de chlore $5\text{g}/\text{m}^3$ dans les chicanes du bassin de désinfection. La capacité de pompage du chlore dans le bassin est de 10 à 15 l/h.



Figure.III.7. Photo Représentant l'Ouvrage de Désinfection.

- Evacuation de l'eau épurée :

Les eaux traitées par la station d'épuration de Timgad seront évacuées dans la nature (Oued Sultz) en amont du barrage Koudiat Medouar et pourront être utilisées pour l'irrigation des plantes et l'espace vert à l'intérieur de station ainsi que pour les terrains agricoles.

- Traitement des boues :

- ✓ Recirculation et extraction des boues :

Les boues aspirées du fonds des clarificateurs sont ensuite amenée dans le puits de pompage des boues de recirculation. Les photos suivantes représentent la station de pompages des boues.

- ✓ Epaissement des boues :
- Stabilisation des boues :

Les boues stabilisées sont également moins génératrices d'odeur et la stabilisation permet également la réduction de pathogènes présents dans les boues.

- Déshydratation :

La déshydratation mécanique des boues permet de réduire le volume des boues en excès avant stockage/épandage.



Figure.III.8. Photo Représentant l'Ouvrage du Pompage des Boues.

- **Supervision :**

La station d'épuration de Timgad est raccordée à un système complètement informatisé de supervision assurant la gestion et la tél-éconduite et la surveillance à distance de l'ensemble des installations de la station.

Il est possible à tout moment, de faire apparaître sur l'écran l'état détaillé de tout installation : moteur en marche ou à l'arrêt, défauts, niveaux, débit, etc.

CHAPITRE IV

ETUDE DE CAS

Dans ce chapitre nous appliquons deux lois continues proposées dans le deuxième chapitre de ce mémoire (lois :Exponentielle et Weibull) pour résoudre le problème constitué de la fiabilité à étudier, ce qui va nous permettre après la comparaison des résultats obtenus par la loi de Weibull entre les différents ouvrages de la Station d'Épuration de faire sortir le meilleur temps moyen du bon fonctionnement ainsi que l'ouvrage le plus disponible au niveau de la Step de Timgad.

1. ANALYSE ET APPLICATION

Le système de fonctionnement de la station d'épuration de Timgad est un système redondant, composé de structures parallèles identiques qui a pour objectif l'amélioration de la sûreté de fonctionnement de la STEP. Le système constitué des équipements redondants est considéré comme fiable ou disponible si au moins un de ses éléments fonctionne. On distingue deux types de redondance : active et majoritaire :

- La redondance active, les moyens sont mis en œuvre simultanément, tous les éléments fonctionnent en permanence et en même temps.
- La redondance majoritaire est telle que certains moyens sont au repos, et qu'ils sont sollicités en cas de défaillance.

La station d'épuration de la ville de Timgad comprend 9 ouvrages tel que :

- Relevage.
- Prétraitement.
- Bassin biologique.
- Clarificateur.
- Désinfection.
- Pompage des Boues.
- Epaisseur.
- Stabilisation.
- Déshydratation.

Et 56 équipements, partagés sur les différents ouvrages cités ci-dessus, composés de pompes, vannes, surpresseurs, compresseurs, agitateurs et aérateurs de surface, filtre à bonde, ponts racleur, diffuseurs d'air, laveur de sable, convoyeur, classificateur dont la station

d'épuration fonctionne avec un système de redondance qui permet de mettre en arrêt propre 13 équipements (arrêt propre veut dire que l'équipement est en arrêt sans qu'il subisse une panne). Afin de bien mener cette étude on a procédé de la façon suivante :

1.1. Collecte des données :

La collecte de données consiste à rassembler les données nécessaires pour effectuer les calculs :

- Les données des pannes sont relevées à partir des fichiers historiques établis par le service d'exploitation et de la maintenance de la STEP.
- Le choix est porté sur les deux dernières années à cause des fichiers historiques tenus à jour depuis Janvier 2013 jusqu'au Décembre 2014.
- Le temps de bon fonctionnement et d'arrêt causé par les pannes des équipements de chaque ouvrage de la STEP en heures.

1.2. Calcul des paramètres $f(t)$, $R(t)$, $F(t)$, $\lambda(t)$ et le MTBF :

Cette étape consiste à calculer les paramètres afin de rendre facile l'application des lois à étudier qu'on souhaite mettre en pratique, les paramètres sont :

- $f(t)$: Densité de probabilité ou fréquence de pannes.
- $F(t)$: Fonction de réparation ou fonction de fréquences cumulées.
- $R(t)$: Fonction de Fiabilité qui est égale à $1 - F(t)$.
- $\lambda(t)$: Taux de Défaillance.
- **MTBF** : Temps Moyen de Bon Fonctionnement.

2. ESTIMATION EMPIRIQUE

2.1. Données de départ

Les données à traiter sont des échantillons de temps de fonctionnement provenant de l'historique de la station de Timgad de ces deux dernières années, durant cette période nous avons observé un total de 194 pannes au niveau de tous les ouvrages de la Step, le tableau suivant représente la distribution des pannes au niveau de chaque ouvrage:

Ouvrage	Nombre de pannes	Nombre d'équipements
Relevage	37	05
Prétraitement	69	16
Bassin Biologique	07	11
Clarificateur	10	06
Désinfection	12	03
Pompages des boues	30	05
Epaississeur	1	03
Stabilisation	3	02
Déshydratation	25	05
Total de la STEP	194	56

Tableau.IV.1.Nombre de Pannes et des Equipementsde la STEP de Timgad.

Le découpage du temps est en 24 classes ce qui représente 24 mois d'observation, le choix des tranches horaires de marche est selon le nombre des jours de chaque mois sachant que la STEP doit fonctionner 24 heures chaque jours sans arrêt (672 heures pour le mois de Février, 720 heures pour les mois de 30 jours et 744 heures pour lesmois de 31 jours). Pour chaque classe (1), on établit le Temps de Bon Fonctionnement (TBF) durant chaque classe (2), le temps d'arrêt dans chaque classe (3), le recensement des pannes de chaque classe (4) puis le cumul des pannes pendant chaque période (5).

Le tableau suivant représente le recensement des données collectées :

Classe (1)	Temps de Bon Fonctionnement TBF (2)	Temps d'arrêt à cause de pannes (3)	Nombre de pannes (4)	Nombre de pannes cumulés (5)
[0 - 744[	705	39	11	11
[744 - 1416[	633	39	12	23
[1416 - 2160[	684	60	11	34
[2160 - 2880[	696	24	6	40
[2880 - 3624[	707	37	8	48
[3624 - 4344[	697	23	7	55
[4344 - 5088[	714	30	7	62
[5088 - 5832[	732	12	4	66
[5832 - 6552[	684	36	9	75
[6552 - 7296[	680	64	11	86
[7296 - 8016[	702	18	7	93
[8016 - 8760[	733	11	3	96
[8760 - 9504[	678	66	13	109
[9504 - 10176[	625	47	8	117
[10176 - 10920[	723	21	10	127
[10920 - 11640[	699	21	11	138
[11640 - 12384[	719	25	9	147
[12384 - 13104[	703	17	6	153
[13104 - 13848[	722	22	10	163
[13848 - 14592[	734	10	4	167
[14592 - 15312[	706	14	7	174
[15312 - 16056[	730	14	6	180
[16056 - 16776[	709	11	7	187
[16776 - 17520[	731	13	7	194
TOTAL	16846 Heures	674 Heures	194 Pannes	

Tableau.IV.2.Recensement des Observations Relevées de la STEP de Timgad.

EXPLICATIONS : Le critère de défaillance est la cessation de l'équipement d'accomplir sa tâche. Durant la période de 0 à 744 heures, onze pannes sont observées, ensuite douze pannes durant la deuxième période, puis onze la troisième période...etc. L'histogramme suivant représente le recensement des pannes observées durant la période de notre étude :

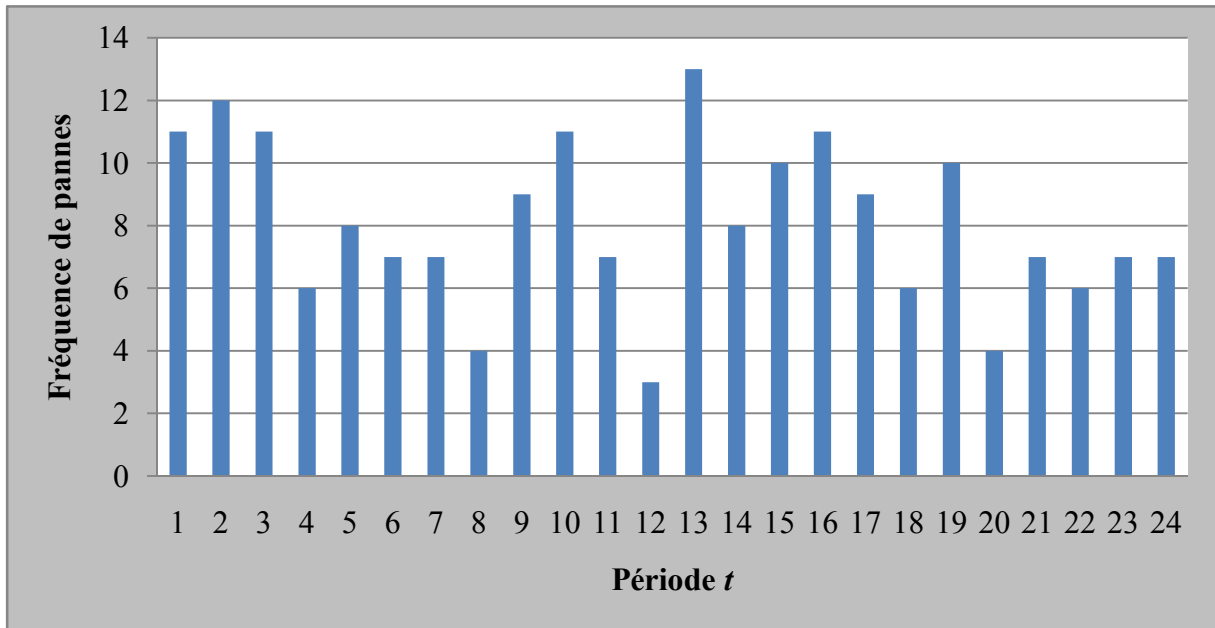


Figure.IV.1. Histogramme Représentant la Fréquence des Pannes Observées.

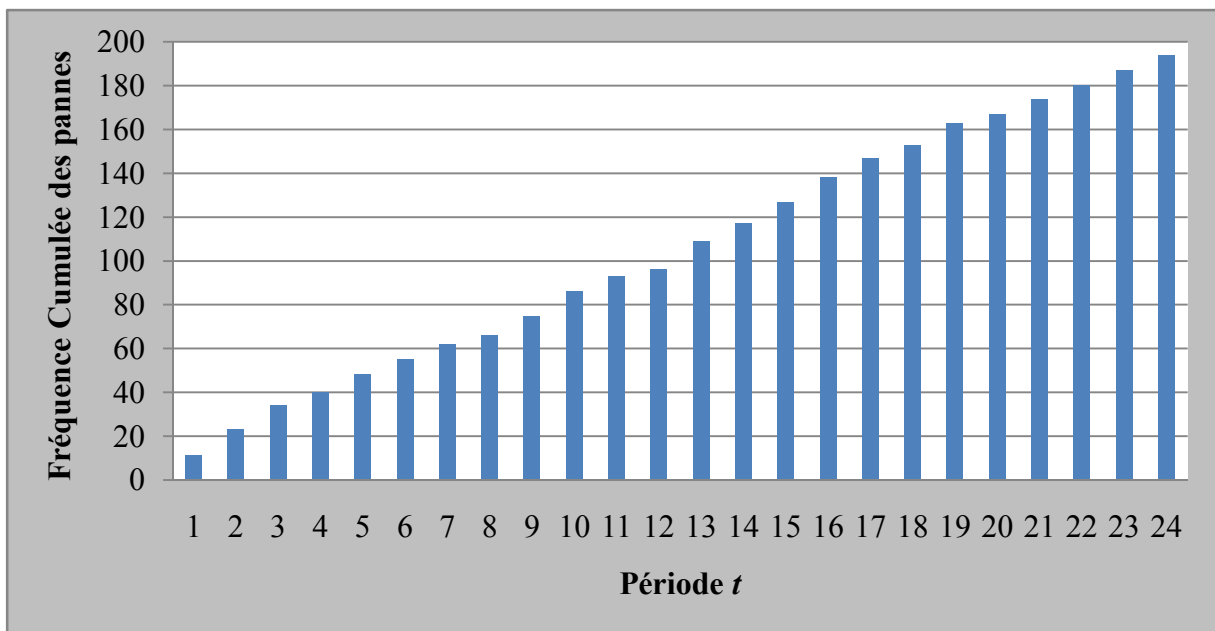


Figure.IV.2. Histogramme Représentant la Fréquence Cumulée des Pannes.

2.2. Traitement de l'échantillon étudié

- Pour des échantillons petits (8 < N < 50) :

On met en œuvre une recherche de lois de probabilités ajustables à l'échantillon. Cette méthode fournira les caractéristiques $f(t), R(t), F(t), (t), E(t) = MTBF$. Ce traitement ne peut pas être appliqué sur notre cas d'étude car l'échantillon étudié égale à N=56.

- Pour les grands échantillons (N > 50, éventuellement > 30) :

On fait appel à une estimation statistique en application de la statistique « descriptive ». Cette méthode donnera des estimations empiriques de la fiabilité de l'échantillon : $R(i), MTBF$ et écart type. Son application sera sur le total des ouvrages de la Step.

L'indicateur de fiabilité **MTBI** de l'échantillon est obtenu directement dans le tableau ci-dessous.

Sa forme générale est : $f_i = \frac{1}{N} \sum n_i * t_i$

$\sum f_i x t_i$ dans le tableau (**MTBI** de l'échantillon).

L'estimation pour la **MTBI** de la population mère est par estimation ponctuelle.

La probabilité cumulative de défaillance est $F(i)$ sur $(0, t)$. Suivant la taille N de l'échantillon et suivant un ordre i allant de $i = 1$ à $i = N$. L'ordre $i = n(t)$ représente la $i^{ème}$ défaillance de l'échantillon alors que l'estimation de la fiabilité $R(i)$ est recommandée par les approximations suivantes :

La taille de l'échantillon	N > 50	50 > N > 20	20 > N
La fiabilité R(i)	$1 - \frac{i}{N}$	$1 - \frac{i}{N+1}$	$1 - \frac{i-0,3}{N+0,4}$

Tableau.IV.3. Estimation de la Fiabilité R(i) Suivant l'Echantillon Etudié.

Le tableau suivant montre l'estimation empirique des données de la Station de Timgad :

Classe (Durée d'usage)	Centre de la classe t_i	Fréquences de pannes n_i	Fréquences cumulées Σn_i	Fréquences relatives $f_i = n_i/N$	Fréquences cumulée $F_i = \Sigma n_i/N$	Fiabilité estimée $R_i = 1 - F_i$	Produit $f_i * t_i$
[0 - 744[	372	11	11	0,0567	0,0567	0,9433	21,0928
[744 - 1416[	1080	12	23	0,0619	0,1186	0,8814	66,8041
[1416 - 2160[	1788	11	34	0,0567	0,1753	0,8247	101,3814
[2160 - 2880[	2520	6	40	0,0309	0,2062	0,7938	77,9381
[2880 - 3624[	3252	8	48	0,0412	0,2474	0,7526	134,1031
[3624 - 4344[	3984	7	55	0,0361	0,2835	0,7165	143,7526
[4344 - 5088[	4716	7	62	0,0361	0,3196	0,6804	170,1649
[5088 - 5832[	5460	4	66	0,0206	0,3402	0,6598	112,5773
[5832 - 6552[	6192	9	75	0,0464	0,3866	0,6134	287,2577
[6552 - 7296[	6924	11	86	0,0567	0,4433	0,5567	392,5979
[7296 - 8016[	7656	7	93	0,0361	0,4794	0,5206	276,2474
[8016 - 8760[	8388	3	96	0,0155	0,4948	0,5052	129,7113
[8760 - 9504[	9132	13	109	0,0670	0,5619	0,4381	611,9381
[9504 - 10176[	9840	8	117	0,0412	0,6031	0,3969	405,7732
[10176 - 10920[	10548	10	127	0,0515	0,6546	0,3454	543,7113
[10920 - 11640[	11280	11	138	0,0567	0,7113	0,2887	639,5876
[11640 - 12384[	12012	9	147	0,0464	0,7577	0,2423	557,2577
[12384 - 13104[	12744	6	153	0,0309	0,7887	0,2113	394,1443
[13104 - 13848[	13476	10	163	0,0515	0,8402	0,1598	694,6392
[13848 - 14592[	14220	4	167	0,0206	0,8608	0,1392	293,1959
[14592 - 15312[	14952	7	174	0,0361	0,8969	0,1031	539,5052
[15312 - 16056[	15684	6	180	0,0309	0,9278	0,0722	485,0722
[16056 - 16776[	16416	7	187	0,0361	0,9639	0,0361	592,3299
[16776 - 17520[	17148	7	194	0,0361	1	0	618,7423
		$N = 194$		$n_i/N = 1$			$\Sigma f_i * t_i = 8290$ heures

Tableau.IV.4. Estimation Empirique de la Fiabilité et la MTBF de laSTEP.

3. Application des Lois

3.1. Application de la Loi Exponentielle

3.1.1. Méthodologie de l'application de Loi Exponentielle

- Préparation des données.
- Détermination des valeurs des taux de défaillance de la STEP de chaque plage (période).
- Détermination de la valeur moyenne du taux de défaillance de la STEP.
- Détermination de la *MTBF*
- Détermination de la probabilité de fonctionnement de $f(t)$, $R(t)$ et de $F(t)$.

3.2. Application de la méthodologie

La distribution exponentielle est applicable pour les périodes à taux de défaillance constant. Tous les équipements de la STEP étudiés sont concernés durant la période d'observation.

En loi exponentielle, $\lambda(t) = \lambda = \text{constante}$, d'où $R(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt} = e^{-\lambda t}$ avec une valeur du taux λ constant.

La loi de fiabilité résultante est une loi exponentielle de forme :

- Fiabilité $R(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt} = e^{-\lambda t}$ avec $\lambda(t) = \text{constante}$.
- Répartition $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$.
- Densité $f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} = -\frac{d(e^{-\lambda t})}{dt}$ donc $f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$
- Espérance mathématique $E(t) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt$

$$E(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} = \text{MTBF}$$

L'espérance de vie ou MTBF correspond à l'espérance mathématique des défaillances, appelée aussi écart type.

Dans cette étude l'application de la loi exponentielle nous permet de calculer ses paramètres principaux qui sont : $R(t)$, $F(t)$, MTBF et le taux de défaillance λ qui est constant.

Le taux de défaillance de la Step de Timgad était estimé par la détermination du taux de défaillance pour chaque période puis le calcul de la valeur moyenne du taux de défaillance de la STEP qui sera considéré comme un taux constant pendant la période de notre étude.

Le tableau suivant représente les résultats obtenus :

Plages horaires	Fréquences de pannes	Fréquence de pannes par plage horaire	Taux de défaillance (Panne/heures)	Densité de la probabilité $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	Fonction de fiabilité $R(t) = e^{-\lambda t}$	Fonction de réparation $F(t) = 1 - R(t)$
[0 - 744[	11	0,2558	0,0003438	0,0002130	0,8253	0,1747
[744 - 1416[	12	0,2791	0,0004153	0,0001791	0,6939	0,3061
[1416 - 2160[	11	0,2558	0,0003438	0,0001478	0,5727	0,4273
[2160 - 2880[	6	0,1395	0,0001938	0,0001227	0,4756	0,5244
[2880 - 3624[	8	0,1860	0,0002501	0,0001013	0,3925	0,6075
[3624 - 4344[	7	0,1628	0,0002261	0,0000841	0,3259	0,6741
[4344 - 5088[	7	0,1628	0,0002188	0,0000694	0,2690	0,7310
[5088 - 5832[	4	0,0930	0,0001250	0,0000573	0,2220	0,7780
[5832 - 6552[	9	0,2093	0,0002907	0,0000476	0,1844	0,8156
[6552 - 7296[	11	0,2558	0,0003438	0,0000393	0,1522	0,8478
[7296 - 8016[	7	0,1628	0,0002261	0,0000326	0,1264	0,8736
[8016 - 8760[	3	0,0698	0,0000938	0,0000269	0,1043	0,8957
[8760 - 9504[	13	0,3023	0,0004064	0,0000222	0,0861	0,9139
[9504 - 10176[	8	0,1860	0,0002769	0,0000187	0,0724	0,9276
[10176 - 10920[	10	0,2326	0,0003126	0,0000154	0,0597	0,9403
[10920 - 11640[	11	0,2558	0,0003553	0,0000128	0,0496	0,9504
[11640 - 12384[	9	0,2093	0,0002813	0,0000106	0,0409	0,9591
[12384 - 13104[	6	0,1395	0,0001938	0,0000088	0,0340	0,9660
[13104 - 13848[	10	0,2326	0,0003126	0,0000072	0,0281	0,9719
[13848 - 14592[	4	0,0930	0,0001250	0,0000060	0,0232	0,9768
[14592 - 15312[	7	0,1628	0,0002261	0,0000050	0,0192	0,9808
[15312 - 16056[	6	0,1395	0,0001875	0,0000041	0,0159	0,9841
[16056 - 16776[	7	0,1628	0,0002261	0,0000034	0,0132	0,9868
[16776 - 17520[	7	0,1628	0,0002188	0,0000028	0,0109	0,9891
Total	194		0,006194			
Valeur moyenne du taux de défaillance λ			0,000258			
Temps moyen de bon fonctionnement MTBF			3875,02heures			

Tableau.IV.5.Calcul des Paramètres de la Loi Exponentielle.

3.2.1. Calcul des paramètres de la Loi Exponentielle

Détails des calculs dans le tableau ci-dessus :

- **Le calcul du taux de défaillance par plage horaire :**

1^{ère} plage : Pour la plage de 0 à 744 heures :

$$= 11/43 = 0,2558 \text{Pannes.}$$

$$\text{Pour une heure, } = \frac{0,2558}{744} = 0,0003438 \text{ panne par heure.}$$

2^{ème} plage : Pour la plage de 744 à 1416 heures :

$$= 12/43 = 0,2791 \text{Pannes.}$$

$$\text{Pour une heure, } (t) = \frac{0,2791}{672} = 0,0001971 \text{ panne par heure.}$$

23^{ème} plage : Pour la plage de 16056 à 16776 heures :

$$= 7/43 = 0,1628 \text{Pannes.}$$

$$\text{Pour une heure, } (t) = \frac{0,1628}{720} = 0,0002261 \text{ panne par heure.}$$

24^{ème} plage : Pour la plage de 16776 à 17520 heures :

$$= 7/43 = 0,1628 \text{Pannes.}$$

$$\text{Pour une heure, } (t) = \frac{0,1628}{744} = 0,0002188 \text{ panne par heure.}$$

- **Le calcul de la valeur moyenne du taux de défaillance $\lambda(t)$**

Taux de défaillance moyen est la somme des taux des défaillances par plage par rapport au nombre des plages utilisées (24 périodes).

$$\text{Taux de défaillance moyen } (t) = \frac{0,006194}{24} = 0,000258 \text{ panne par heure.}$$

- **Le calcul du temps moyen de bon fonctionnement *MTBF***

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,000258} = 3875,02 \quad 3875 \text{ heures.}$$

3.2.2. Calcul de la probabilité de fonctionnement $f(t)$, $R(t)$ et $F(t)$

1^{ère} plage : Pour la plage de 0 à 744 heures :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} = 0,258 \times 10^{-3} e^{-0,258 \times 10^{-3} \times 744} = 0,2130 \times 10^{-3}$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,258 \times 10^{-3} \times 744} = 0,8253 = 82,53\%.$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-0,258 \times 10^{-3} \times 744} = 1 - 0,8253 = 0,1747 = 17,47\%.$$

2^{ème} plage : Pour la plage de 744 à 1416 heures :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} = 0,258 \times 10^{-3} e^{-0,258 \times 10^{-3} \times 1416} = 0,1791 \times 10^{-3}$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,258 \times 10^{-3} \times 1416} = 0,6939 = 69,39\%.$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-0,258 \times 10^{-3} \times 1416} = 1 - 0,6939 = 0,3061 = 30,61\%$$

23^{ème} plage : Pour la plage de 16056 à 16776 heures :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} = 0,258 \times 10^{-3} e^{-0,258 \times 10^{-3} \times 16776} = 0,34 \times 10^{-5}$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,258 \times 10^{-3} \times 16776} = 0,0132 = 1,32\%.$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-0,258 \times 10^{-3} \times 16560} = 1 - 0,0132 = 0,9868 = 98,68\%.$$

24^{ème} plage : Pour la plage de 16776 à 17520 heures :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} = 0,258 \times 10^{-3} e^{-0,258 \times 10^{-3} \times 17520} = 0,28 \times 10^{-5}$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,258 \times 10^{-3} \times 17520} = 0,0109 = 1,09\%.$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} = 1 - e^{-0,258 \times 10^{-3} \times 17520} = 1 - 0,0109 = 0,9891 = 98,91\%.$$

La représentation graphique des résultats obtenus par la Loi Exponentielle est comme suit :

La loi de distribution suit une Loi Exponentielle $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$:

Pour $t = 0$, $f(0) = \lambda$.

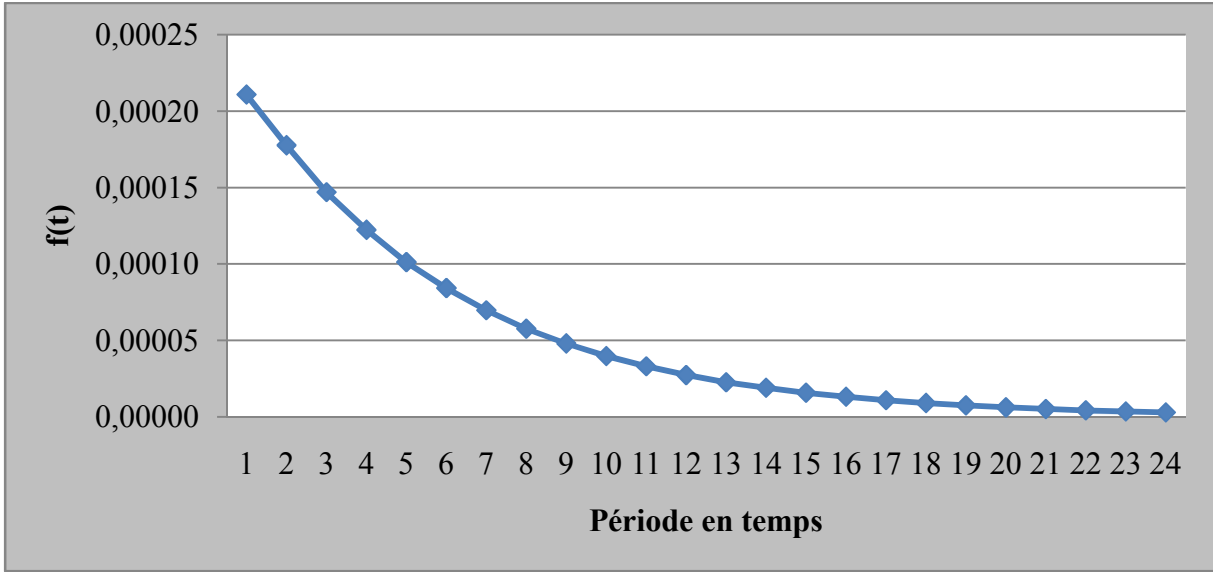


Figure.IV.3. Courbe de la Distribution des Pannes

La fiabilité se calcule par la formule suivante : $R(t) = e^{-\lambda t}$

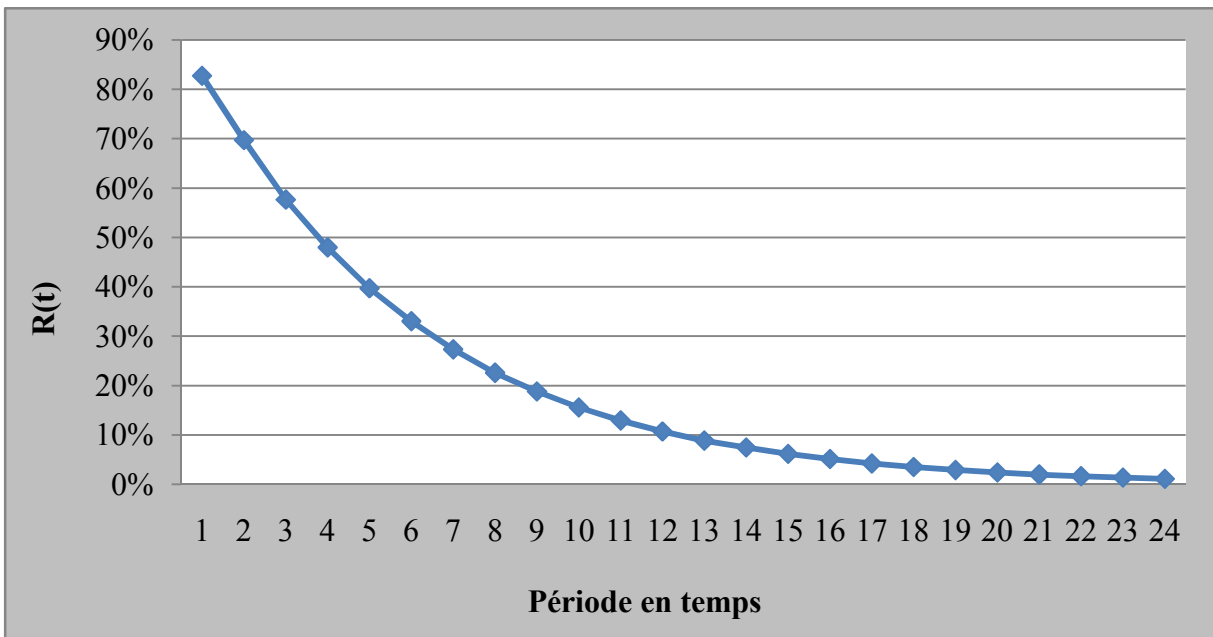


Figure.IV.4. Courbe de la Loi Exponentielle de la Fiabilité R(t).

La loi de réparation se calcul de la formule suivante : $F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t}$

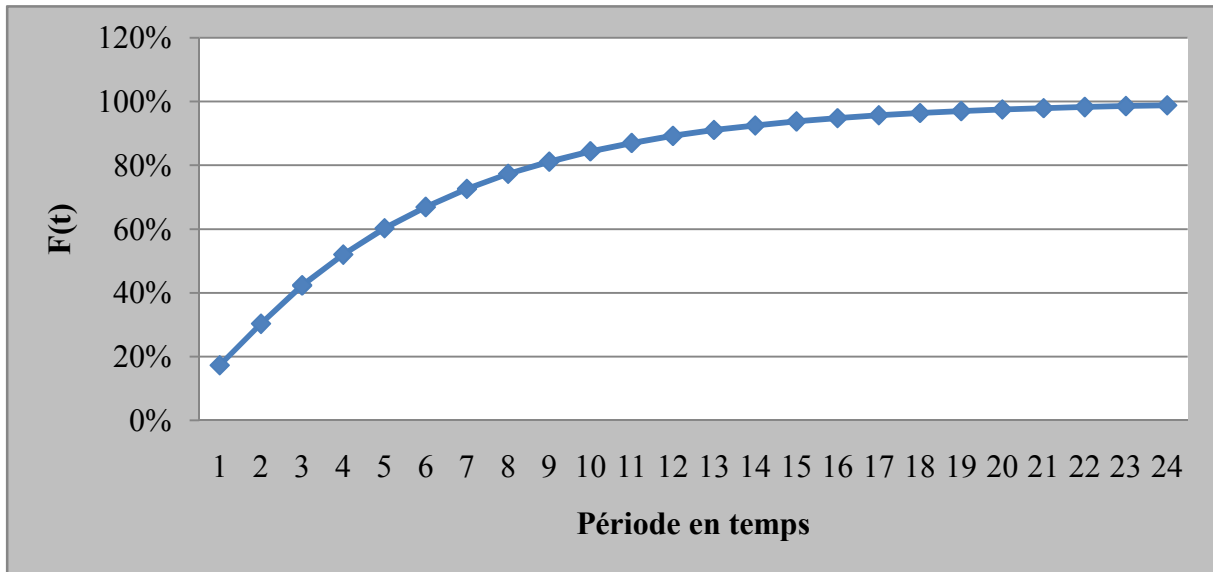


Figure.IV.5. Courbe de la Fonction de Réparation des Pannes F(t).

On calcule la fonction de fiabilité à l'instant $t = MTBF = 3875$ heures :

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,258 \times 10^{-3} \times 3875} = 0,3679 = 36,79\%.$$

La figure ci-dessous représente la valeur de la fiabilité à l'instant $t = MTBF$:

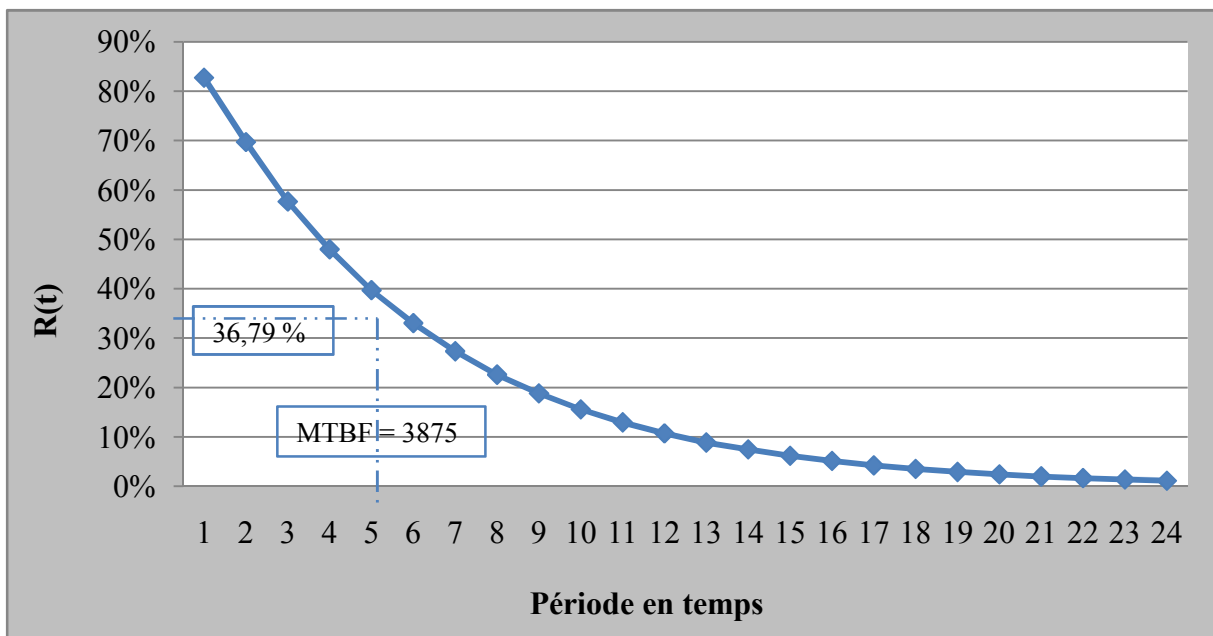


Figure.IV.6. Courbe de la Détermination de la MTBF.

EXPLICATIONS : La chance d'arriver à une durée $MTBF = 3875$ heures est de 36,79%.

4. Application de la Loi de Weibull

4.1. Méthodologie de l'application de la Loi de Weibull

- Préparation des données dont on:
 - 1- Classé le temps de bon fonctionnement en heures par ordre croissant.
 - 2- Cumule des pannes.
 - 3- Calcule les fréquences Cumulées des pannes.
 - 4- Calcule $F(t), R(t)$ en fonction de la taille de l'échantillon (dans notre cas, on traite trois échantillons comme exemple d'application et le cas général de la STEP).
- Tracé du nuage de points (t_i, F_i) et la droite de Weibull (D_1).
- Détermination des valeurs des paramètres β, η, γ .
- Fonctions de la Loi de Weibull $f(t), F(t), R(t), \lambda(t)$.
- Détermination de la valeur du $MTBF$.
- Exploitation des résultats.

4.2. Application de la méthodologie

4.2.1. Préparation des données :

Cette loi permet de connaître le comportement statique des ouvrages de la station et leurs matériels en termes de [livres SDF des équipements industriels] :

- Fréquences de pannes $F(t)$ ou fonction de réparation.
- Fiabilité $R(t)$.
- Taux de défaillances $\lambda(t)$.
- Différent paramètres caractérisant la loi tel que β, η, γ :

Dans le cadre de l'application de la Loi de Weibull, nous proposons une méthode de calcul des paramètres sur la base de l'historique des pannes observées pour chaque ouvrage voir le consolidé de la STEP Timgad durant les deux dernières années, les tableaux suivants représentant le calcul des fonctions de $f(t), F(t), R(t)$ de trois ouvrages pris comme des exemples d'application ainsi que le total de la STEP :

Les ouvrages choisis dans notre cas d'étude pour l'application de la Loi de Weibull sont :

- Ouvrage Clarificateur.
- Ouvrage Pompage des Boues.
- Ouvrage Prétraitement.
- **Ouvrage Clarificateur :**

Le tableau suivant montre le traitement des données collectées de l'échantillon de l'ouvrage Clarificateur :

Ordre i	Temps de Bon Fonctionnement Croissant trié TBF_i en heures	Nombre de pannes n_i	Nombre de pannes Cumulés n_i	Fonction de Fiabilité Cumulée $F(i) = \frac{(n_i - 0,3)}{(N + 0,4)}$	Fiabilité $R(i) = 1 - F(i)$
1	250	1	1	0,067	0,933
2	281	1	2	0,163	0,837
3	377	1	3	0,260	0,740
4	442	1	4	0,356	0,644
5	508	1	5	0,452	0,548
6	607	1	6	0,548	0,452
7	843	1	7	0,644	0,356
8	859	1	8	0,740	0,260
9	1091	1	9	0,837	0,163
10	2762	1	10	0,933	0,067

Tableau.IV.6. Calcul des Fonctions de la Loi de Weibull pour l'Ouvrage Clarificateur.

La taille de l'échantillon traité (Clarificateur) égale à : $N = 7$, il est recommandé d'utiliser l'approximation des rangs médians ($N \geq 20$) pour le calcul de $F(i)$:

$$F(i) = \frac{(n_i - 0,3)}{(N + 0,4)} \text{ Avec } R(i) = 1 - \frac{(n_i - 0,3)}{(N + 0,4)}$$

- **Ouvrage Pompage des Boues :**

Le tableau ci-dessous présente le traitement des données collectées de l'échantillon de l'ouvrage Pompes des Boues :

Ordre i	Temps de Bonne Trié TBF en heures	Nombre de pannes n_i	Nombre de pannes Cumulées n_i	Fonction Cumulée $F(i) = \frac{\sum_{j=1}^i n_j}{N+1}$	Faillabilité $R(i) = 1 - F(i)$
1	46	1	1	0,032	0,968
2	106	1	2	0,065	0,935
3	120	1	3	0,097	0,903
4	134	1	4	0,129	0,871
5	137	1	5	0,161	0,839
6	229	1	6	0,194	0,806
7	240	1	7	0,226	0,774
8	252	1	8	0,258	0,742
9	336	1	9	0,290	0,710
10	360	1	10	0,323	0,677
11	510	1	11	0,355	0,645
12	518	1	12	0,387	0,613
13	533	1	13	0,419	0,581
14	534	1	14	0,452	0,548
15	575	1	15	0,484	0,516
16	583	1	16	0,516	0,484
17	600	1	17	0,548	0,452
18	605	1	18	0,581	0,419
19	620	1	19	0,613	0,387
20	625	1	20	0,645	0,355
21	630	1	21	0,677	0,323
22	631	1	22	0,710	0,290
23	654	1	23	0,742	0,258
24	690	1	24	0,774	0,226
25	708	1	25	0,806	0,194
26	758	1	26	0,839	0,161
27	812	1	27	0,871	0,129
28	1312	1	28	0,903	0,097
29	1407	1	29	0,935	0,065
30	1612	1	30	0,968	0,032

Tableau.IV.7. Calcul des Fonctions de la Loi de Weibull pour l'Ouvrage Pompage des Boues.

La taille de l'échantillon traité (Pompage des Boues) égale à : $N = 30$, il est recommandé d'utiliser l'approximation des rangs moyens ($50 > N > 20$) pour le calcul de $F(i)$:

$$F(i) = \frac{\sum_{j=1}^i n_j}{N+1} \quad \text{Avec} \quad R(i) = 1 - \frac{\sum_{j=1}^i n_j}{N+1}$$

- **Ouvrage Prétraitement :**

Le tableau qui suit présente le traitement des données collectées de l'échantillon de l'ouvrage Prétraitement :

Ordre i	Temps de Bon Fonctionnement Trié $T_{BF}^{(i)}$ en heures	Nombre de pannes n_i	Nombre de pannes Cumulées N_i	Fréquence Cumulée $F(i) = \frac{N_i}{N}$	Faillabilité $R(i) = 1 - F(i)$
1	36	1	1	0,014	0,986
2	43	1	2	0,029	0,971
3	70	1	3	0,043	0,957
4	107	1	4	0,058	0,942
5	120	1	5	0,072	0,928
6	146	1	6	0,087	0,913
7	179	1	7	0,101	0,899
8	184	1	8	0,116	0,884
9	189	1	9	0,130	0,870
10	192	1	10	0,145	0,855
11	200	1	11	0,159	0,841
12	200	1	12	0,174	0,826
13	210	1	13	0,188	0,812
14	227	1	14	0,203	0,797
15	229	1	15	0,217	0,783
16	264	1	16	0,232	0,768
17	273	1	17	0,246	0,754
18	276	1	18	0,261	0,739
19	280	1	19	0,275	0,725
20	296	1	20	0,290	0,710
21	300	1	21	0,304	0,696
22	324	1	22	0,319	0,681
23	325	1	23	0,333	0,667
24	338	1	24	0,348	0,652
25	339	1	25	0,362	0,638
26	344	1	26	0,377	0,623
27	350	1	27	0,391	0,609
28	370	1	28	0,406	0,594
29	371	1	29	0,420	0,580
30	373	1	30	0,435	0,565
31	394	1	31	0,449	0,551
32	394	1	32	0,464	0,536
33	394	1	33	0,478	0,522
34	407	1	34	0,493	0,507
35	408	1	35	0,507	0,493
36	413	1	36	0,522	0,478
37	432	1	37	0,536	0,464
38	454	1	38	0,551	0,449
39	487	1	39	0,565	0,435
40	505	1	40	0,580	0,420
41	508	1	41	0,594	0,406

42	526	1	42	0,609	0,391
43	565	1	43	0,623	0,377
44	575	1	44	0,638	0,362
45	591	1	45	0,652	0,348
46	603	1	46	0,667	0,333
47	612	1	47	0,681	0,319
48	615	1	48	0,696	0,304
49	625	1	49	0,710	0,290
50	631	1	50	0,725	0,275
51	635	1	51	0,739	0,261
52	648	1	52	0,754	0,246
53	663	1	53	0,768	0,232
54	728	1	54	0,783	0,217
55	797	1	55	0,797	0,203
56	806	1	56	0,812	0,188
57	838	1	57	0,826	0,174
58	862	1	58	0,841	0,159
59	863	1	59	0,855	0,145
60	873	1	60	0,870	0,130
61	884	1	61	0,884	0,116
62	916	1	62	0,899	0,101
63	919	1	63	0,913	0,087
64	982	1	64	0,928	0,072
65	993	1	65	0,942	0,058
66	1007	1	66	0,957	0,043
67	1243	1	67	0,971	0,029
68	1285	1	68	0,986	0,014
69	1415	1	69	1	0

Tableau.IV.8. Calcul des Fonctions de la Loi de Weibull pour l'Ouvrage Prétraitement.

La taille de l'échantillon traité (Prétraitement) égale à : $N = 69$, il est recommandé d'utiliser l'approximation ($N > 50$) pour le calcul de $F(i)$:

$$F(i) = \frac{\sum_{j=1}^i n_j}{N} \quad \text{Avec} \quad R(i) = 1 - \frac{\sum_{j=1}^i n_j}{N}$$

- **Cas de la STEP :**

Le tableau suivant montre le calcul des fonctions $F(i)$, $R(i)$ par le traitement des données collectées et observées au niveau de la STEP de Timgad durant les deux dernières années :

Ordre i	Temps de Bon Fonctionnement Trié $TBF_{(i)}$ en heures	Nombre de panne n_i	Nombre de pannes cumulé n_i	Fréquence Cumulée $F(i) = \frac{n_i}{N}$	Fiaiblité $R(i) = 1 - F(i)$
1	4	1	1	0,005	0,995
2	9	1	2	0,010	0,990
3	11	1	3	0,015	0,985
4	27	1	4	0,021	0,979
5	36	1	5	0,026	0,974
6	43	1	6	0,031	0,969
7	46	1	7	0,036	0,964
8	70	1	8	0,041	0,959
9	72	1	9	0,046	0,954
10	72	1	10	0,052	0,948
11	86	1	11	0,057	0,943
12	87	1	12	0,062	0,938
13	93	1	13	0,067	0,933
14	105	1	14	0,072	0,928
15	106	1	15	0,077	0,923
16	107	1	16	0,082	0,918
17	116	1	17	0,088	0,912
18	120	1	18	0,093	0,907
19	120	1	19	0,098	0,902
20	120	1	20	0,103	0,897
21	133	1	21	0,108	0,892
22	134	1	22	0,113	0,887
23	137	1	23	0,119	0,881
24	146	1	24	0,124	0,876
25	147	1	25	0,129	0,871
26	149	1	26	0,134	0,866
27	149	1	27	0,139	0,861
28	152	1	28	0,144	0,856
29	153	1	29	0,149	0,851
30	161	1	30	0,155	0,845
31	163	1	31	0,160	0,840
32	167	1	32	0,165	0,835
33	174	1	33	0,170	0,830
34	179	1	34	0,175	0,825
35	179	1	35	0,180	0,820
36	184	1	36	0,186	0,814
37	189	1	37	0,191	0,809
38	192	1	38	0,196	0,804
39	199	1	39	0,201	0,799
40	200	1	40	0,206	0,794
41	200	1	41	0,211	0,789
42	203	1	42	0,216	0,784
43	207	1	43	0,222	0,778
44	210	1	44	0,227	0,773
45	227	1	45	0,232	0,768
46	229	1	46	0,237	0,763

47	229	1	47	0,242	0,758
48	238	1	48	0,247	0,753
49	240	1	49	0,253	0,747
50	249	1	50	0,258	0,742
51	250	1	51	0,263	0,737
52	252	1	52	0,268	0,732
53	264	1	53	0,273	0,727
54	272	1	54	0,278	0,722
55	273	1	55	0,284	0,716
56	273	1	56	0,289	0,711
57	276	1	57	0,294	0,706
58	280	1	58	0,299	0,701
59	281	1	59	0,304	0,696
60	285	1	60	0,309	0,691
61	296	1	61	0,314	0,686
62	300	1	62	0,320	0,680
63	301	1	63	0,325	0,675
64	304	1	64	0,330	0,670
65	307	1	65	0,335	0,665
66	313	1	66	0,340	0,660
67	320	1	67	0,345	0,655
68	324	1	68	0,351	0,649
69	325	1	69	0,356	0,644
70	328	1	70	0,361	0,639
71	335	1	71	0,366	0,634
72	336	1	72	0,371	0,629
73	338	1	73	0,376	0,624
74	338	1	74	0,381	0,619
75	339	1	75	0,387	0,613
76	344	1	76	0,392	0,608
77	350	1	77	0,397	0,603
78	360	1	78	0,402	0,598
79	366	1	79	0,407	0,593
80	370	1	80	0,412	0,588
81	371	1	81	0,418	0,582
82	373	1	82	0,423	0,577
83	377	1	83	0,428	0,572
84	378	1	84	0,433	0,567
85	394	1	85	0,438	0,562
86	394	1	86	0,443	0,557
87	394	1	87	0,448	0,552
88	405	1	88	0,454	0,546
89	407	1	89	0,459	0,541
90	408	1	90	0,464	0,536
91	413	1	91	0,469	0,531
92	415	1	92	0,474	0,526
93	430	1	93	0,479	0,521
94	432	1	94	0,485	0,515
95	434	1	95	0,490	0,510
96	438	1	96	0,495	0,505

97	442	1	97	0,500	0,500
98	454	1	98	0,505	0,495
99	471	1	99	0,510	0,490
100	477	1	100	0,515	0,485
101	482	1	101	0,521	0,479
102	487	1	102	0,526	0,474
103	505	1	103	0,531	0,469
104	508	1	104	0,536	0,464
105	508	1	105	0,541	0,459
106	510	1	106	0,546	0,454
107	518	1	107	0,552	0,448
108	526	1	108	0,557	0,443
109	528	1	109	0,562	0,438
110	533	1	110	0,567	0,433
111	534	1	111	0,572	0,428
112	538	1	112	0,577	0,423
113	540	1	113	0,582	0,418
114	547	1	114	0,588	0,412
115	551	1	115	0,593	0,407
116	565	1	116	0,598	0,402
117	566	1	117	0,603	0,397
118	567	1	118	0,608	0,392
119	575	1	119	0,613	0,387
120	575	1	120	0,619	0,381
121	583	1	121	0,624	0,376
122	591	1	122	0,629	0,371
123	598	1	123	0,634	0,366
124	600	1	124	0,639	0,361
125	603	1	125	0,644	0,356
126	605	1	126	0,649	0,351
127	607	1	127	0,655	0,345
128	612	1	128	0,660	0,340
129	615	1	129	0,665	0,335
130	620	1	130	0,670	0,330
131	625	1	131	0,675	0,325
132	625	1	132	0,680	0,320
133	629	1	133	0,686	0,314
134	630	1	134	0,691	0,309
135	631	1	135	0,696	0,304
136	631	1	136	0,701	0,299
137	635	1	137	0,706	0,294
138	648	1	138	0,711	0,289
139	653	1	139	0,716	0,284
140	654	1	140	0,722	0,278
141	663	1	141	0,727	0,273
142	690	1	142	0,732	0,268
143	708	1	143	0,737	0,263
144	709	1	144	0,742	0,258
145	728	1	145	0,747	0,253
146	758	1	146	0,753	0,247

147	767	1	147	0,758	0,242
148	797	1	148	0,763	0,237
149	800	1	149	0,768	0,232
150	806	1	150	0,773	0,227
151	812	1	151	0,778	0,222
152	838	1	152	0,784	0,216
153	843	1	153	0,789	0,211
154	859	1	154	0,794	0,206
155	862	1	155	0,799	0,201
156	863	1	156	0,804	0,196
157	868	1	157	0,809	0,191
158	873	1	158	0,814	0,186
159	884	1	159	0,820	0,180
160	885	1	160	0,825	0,175
161	916	1	161	0,830	0,170
162	919	1	162	0,835	0,165
163	923	1	163	0,840	0,160
164	944	1	164	0,845	0,155
165	982	1	165	0,851	0,149
166	993	1	166	0,856	0,144
167	1007	1	167	0,861	0,139
168	1039	1	168	0,866	0,134
169	1090	1	169	0,871	0,129
170	1091	1	170	0,876	0,124
171	1135	1	171	0,881	0,119
172	1145	1	172	0,887	0,113
173	1243	1	173	0,892	0,108
174	1251	1	174	0,897	0,103
175	1285	1	175	0,902	0,098
176	1312	1	176	0,907	0,093
177	1313	1	177	0,912	0,088
178	1407	1	178	0,918	0,082
179	1415	1	179	0,923	0,077
180	1424	1	180	0,928	0,072
181	1612	1	181	0,933	0,067
182	1654	1	182	0,938	0,062
183	1674	1	183	0,943	0,057
184	1688	1	184	0,948	0,052
185	1834	1	185	0,954	0,046
186	1845	1	186	0,959	0,041
187	2406	1	187	0,964	0,036
188	2762	1	188	0,969	0,031
189	2900	1	189	0,974	0,026
190	2961	1	190	0,979	0,021
191	4138	1	191	0,985	0,015
192	5506	1	192	0,990	0,010
193	5910	1	193	0,995	0,005
194	10030	1	194	1,000	0,000

Tableau.IV.9. Calcul des Fonctions de la Loi de Weibull pour la STEP de Timgad.

La loi de Weibull est caractérisée par les fonctions suivantes :

- Fonction de distribution :

$$\begin{cases} f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right] & \text{avec } t \geq \gamma \\ f(t) = 0 & t < \gamma \end{cases}$$

- Fiabilité :

$$\begin{cases} R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right], & t \geq \gamma \\ R(t) = 1, & t < \gamma \end{cases}$$

Si : $\gamma = 0$, on obtient :

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

- Répartition :

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

- Taux de défaillance :

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

- Moyenne des temps de bon fonctionnement *MTBF* :

$$MTBF = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = \gamma + \eta \cdot A$$

4.2.2. Tracé du nuage des points et la droite D_1 de Weibull

- Tracé du nuage de points (t_i, F_i)

Les figures suivantes représentent les nuages des points (t_i, F_i) des ouvrages choisis comme des exemples d'application et de la STEP :

- Ouvrage Clarificateur :

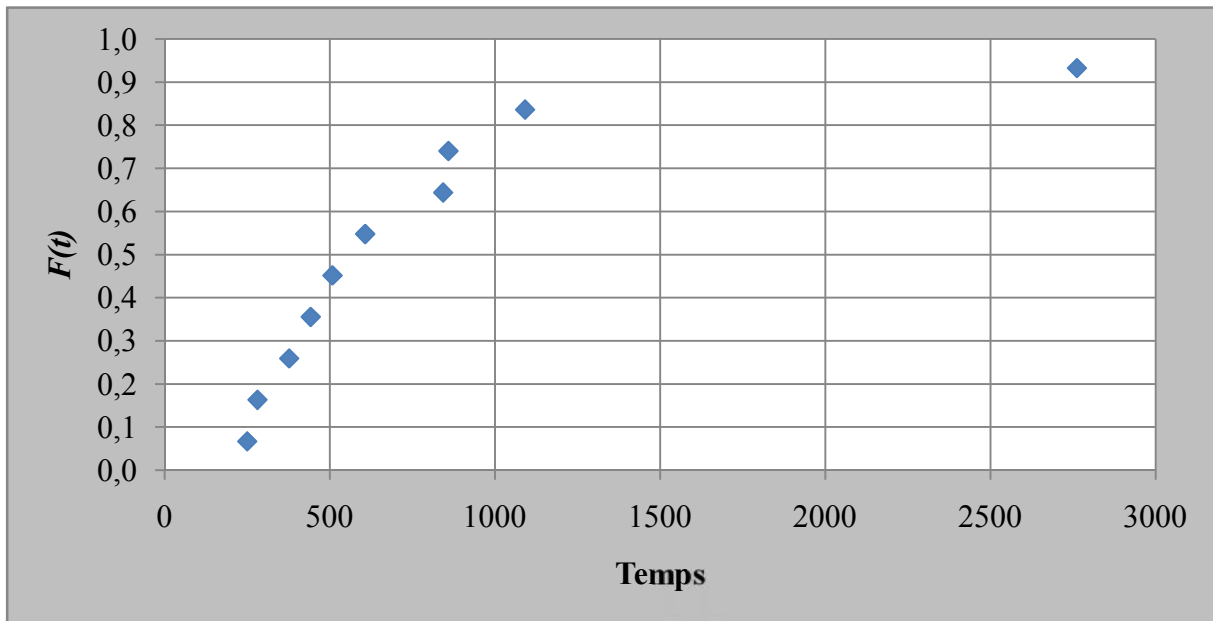


Figure.IV.7. Tracé du Nuage de Points(t_i, F_i) de l'Ouvrage Clarificateur.

- Ouvrage Pompage des Boues :

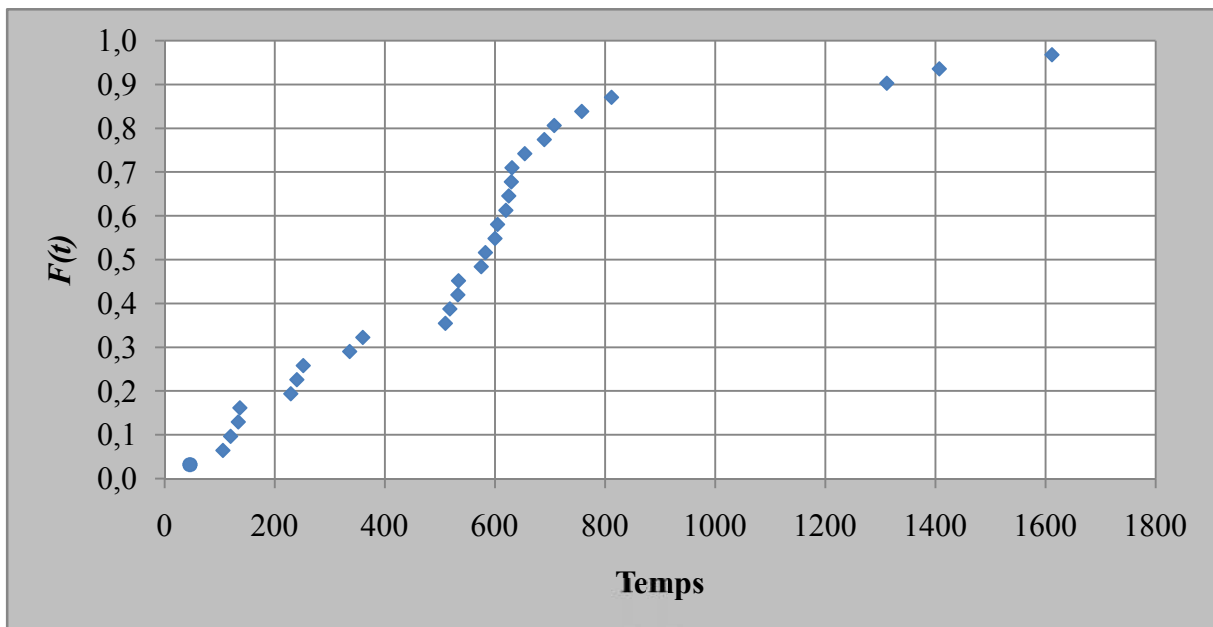


Figure.IV.8. Tracé du Nuage de Points(t_i, F_i) de l'ouvrage Pompage des Boues.

- Ouvrage Prétraitement :

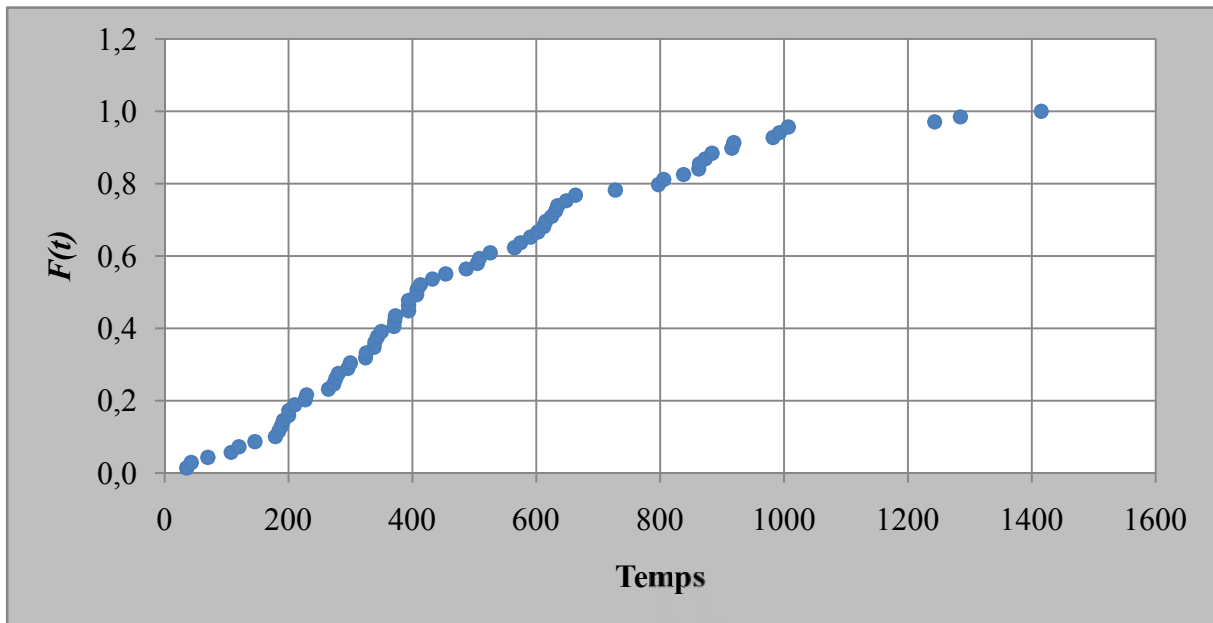


Figure.IV.9. Tracé du Nuage de Points (t_i, F_i) de l'ouvrage Prétraitement.

- Nuage de points (t_i, F_i) de la STEP :

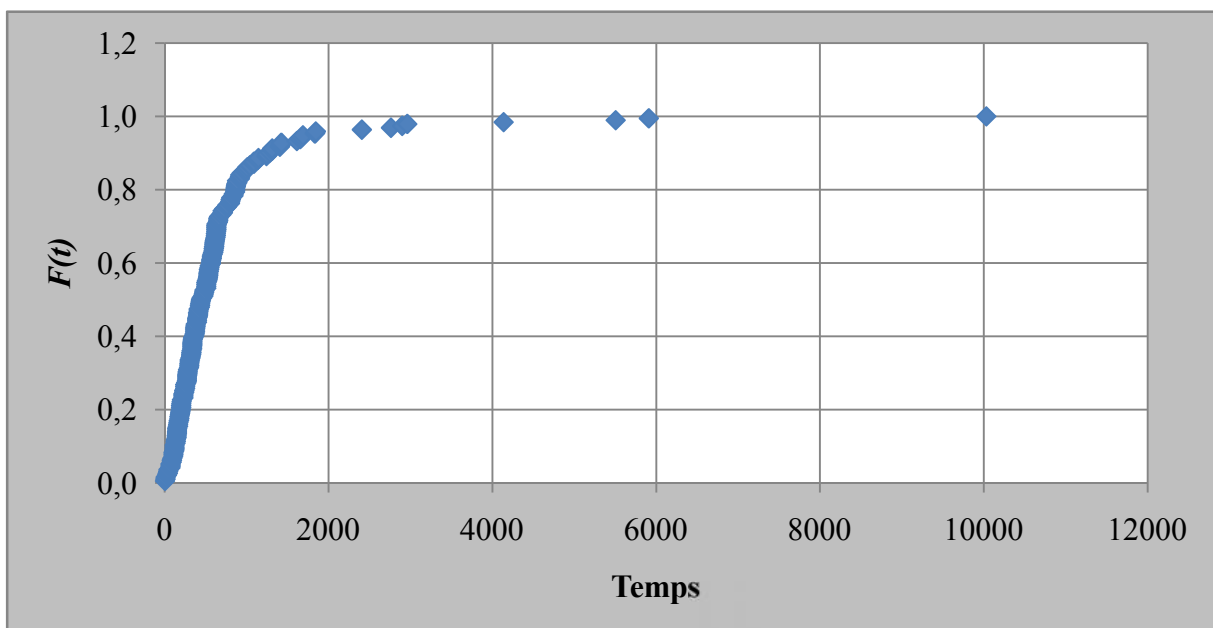


Figure.IV.10. Tracé du Nuage de Points (t_i, F_i) de la STEP de Timgad.

- Tracé de la droite de Weibull (D₁)

Le tracé de la droite de Weibull est représenté dans la figure suivante, qu'on va le prendre comme un modèle dans le reste des calculs pour la détermination des paramètres (β, η, γ) , l'exemple modèle à appliquer est celui de l'ouvrage Clarificateur :

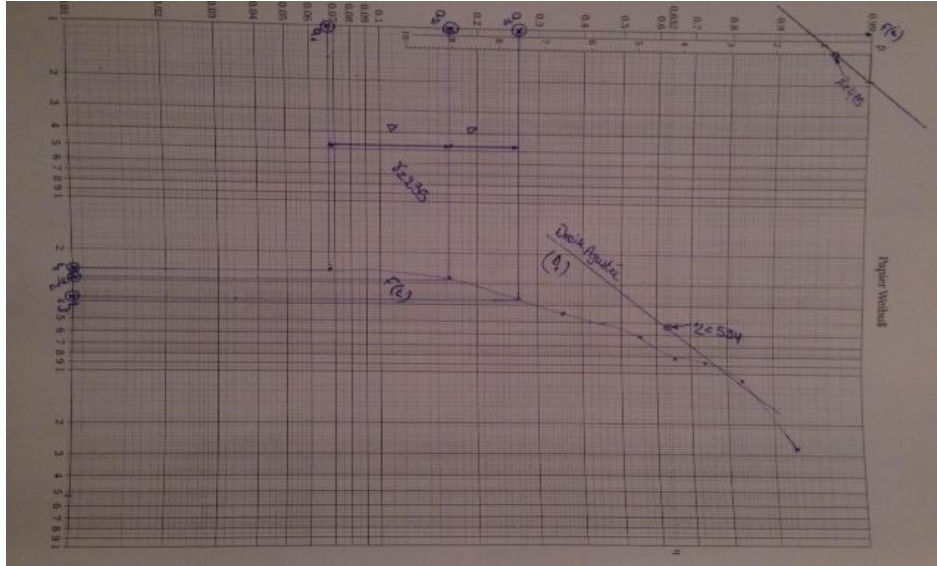


Figure.IV.11.Tracé Manuel sur le Papier de Weibull de l'Ouvrage Clarificateur.

4.2.3. Détermination des valeurs des paramètres β, η, γ

- Détermination de γ :

Le nuage des points (t_i, F_i) obtenu dans la figure.IV.7 ne correspond pas à une droite, ce qui signifie que $\gamma \neq 0$, donc le paramètre γ a une valeur non nulle à déterminer.

On ajuste le nuage de points obtenu par une translation de tous les points en ajoutant ou en retranchant aux abscisses "t", une même valeur (gamma) afin d'obtenir une droite par l'application d'une formule de redressement. La valeur de translation finale est γ est calculer comme suit :

$$\gamma = \frac{t_1 t_3 - t_2^2}{t_1 + t_3 - 2t_2}$$

- Détermination Analytique de la valeur de gamma sera comme suit :

Prenons trois points A_1, A_2 et A_3 sur le nuage de points de la figure.IV.11 tels que $(a_1, a_2) = (a_2, a_3) = \Delta$. Il est conseillé de prendre des points espacés mais non extrêmes.

Nous choisissons les valeurs sur l'axe des $F_i(t)$:

$$a_1 = 0,067. a_2 = 0,163. a_3 = 0,259$$

Où

$$= (a_1, a_2) = (a_2, a_3) = 0,163 - 0,067 = 0,259 - 0,163 = 0,096$$

Nous lisons les valeurs t_1, t_2 et t_3 sur l'axe des TBF (t) correspondant aux a_1, a_2, a_3 sur le graphe de nuage de points: $t_1 = 250, t_2 = 281, t_3 = 377$

$$\gamma = \frac{(250 \times 377) - (281)^2}{(250 + 377) - 2 \times 281} = 235 \text{ unités de temps.}$$

Donc, on obtient la valeur de gamma : $\gamma = 235$ unités de temps.

- **Détermination de β et η :**

La linéarisation du modèle de Weibull nous donne l'équation suivante

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

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

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

Donc l'équation est sous la forme $Y = AX + B$, où

$$\begin{cases} Y = \ln\left[\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right] \\ X = \ln(t - \gamma) \quad \text{avec } t \geq \gamma \\ A = \beta \text{ et } B = \beta \ln \eta \end{cases}$$

Pour déterminer des paramètres de la loi de Weibull à base des temps de bon fonctionnement (TBF), nous faisons appel à la méthode des moindres carrés dont cette démarche consiste à chercher une droite pour minimiser la sommes des carrés des distances horizontales des divers points à la droite afin estimer les paramètres (β, η) . [Estimation de fiabilité de la loi de Weibull].

Les expressions suivantes nous permettent le calcul des paramètres comme suit :

$$\beta = \frac{x_i y_i - \bar{y} \sum x_i}{\sum (x_i)^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}$$

$$\eta = \exp \left(\bar{x} - \frac{\bar{y}}{\beta} \right)$$

Avec :

- $y_i = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(t_i)} \right) \right]$ et t_i représente le temps.
- $x_i = \ln(t_i - \gamma)$.
- $\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n$.
- $\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n$.

Les résultats de calcul sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Ordre i	x_i	$(x_i)^2$	y_i	$x_i y_i$
1	2,708	7,334	-2,664	-7,214
2	3,829	14,658	-1,723	-6,598
3	4,956	24,560	-1,202	-5,957
4	5,333	28,438	-0,822	-4,382
5	5,609	31,466	-0,509	-2,853
6	5,919	35,033	-0,230	-1,364
7	6,410	41,090	0,033	0,211
8	6,436	41,424	0,299	1,925
9	6,752	45,593	0,594	4,011
10	7,835	61,384	0,993	7,778
Somme	55,787	330,981	-5,231	-14,443
Moyenne	5,579	33,098	-0,523	-1,444

Tableau.IV.10. Calcul des Paramètres de la Régression (x, y) .

A partir du tableau.IV.10 le calcul des paramètres sera comme suit :

$$\beta = \frac{x_i y_i - \bar{y} \sum x_i}{(x_i)^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} = \frac{(-14,443) - (-0,523) \times (55,787)}{(330,981 - \frac{(55,787)^2}{10})} = 0,75$$

La formule de calcul de η est comme suit :

$$\eta = \exp\left(\bar{x} - \frac{\bar{y}}{\beta}\right) = \exp\left(5,579 - \frac{(-0,523)}{0,75}\right) = 552 \text{ heures}$$

Les trois paramètres de Weibull pour cet ouvrage :

$$\begin{cases} \gamma = 235 \text{ heures} \\ \beta = 0,75 \\ \eta = 534 \text{ heures} \end{cases}$$

Et la fonction de la fiabilité $R(t)$:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t - 235}{534}\right)^{0,75}\right]$$

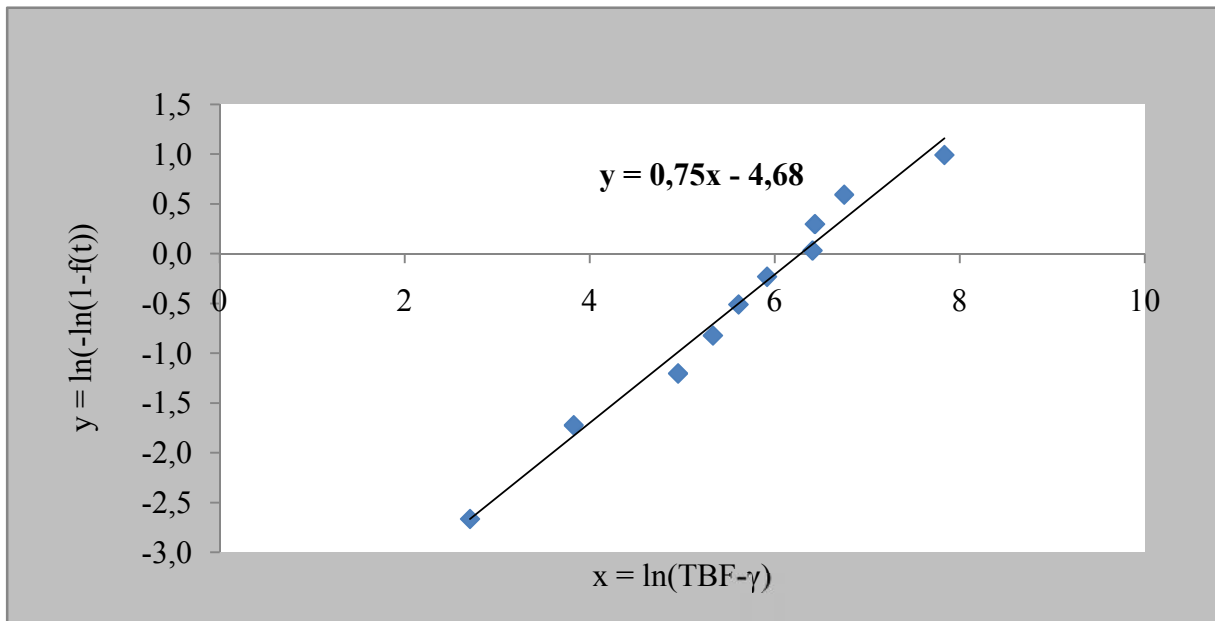


Figure.IV.12. Détermination des Paramètres (β, η) par une Droite Ajustée.

4.2.4. Détermination des Fonctions $f(t), F(t), R(t), \lambda(t)$ de la Loi de Weibull

Le tableau suivant montre les nouvelles valeurs représentant les fonctions de la Loi de Weibull pour l'exemple du modèle traité de l'ouvrage Clarificateur :

TBF	$\frac{f_w(t)}{F_w(t)}$	$\frac{F_w(t)}{R_w(t)}$	$\frac{R_w(t)}{\lambda_w(t)}$	$\frac{f_w(t)}{\lambda_w(t)}$
250	0,000537	0,0663	0,9337	0,000575
281	0,000649	0,1470	0,8530	0,000761
377	0,000696	0,3095	0,6905	0,00101
442	0,000678	0,3882	0,6118	0,001108
508	0,000649	0,4537	0,5463	0,001188
607	0,000599	0,5335	0,4665	0,001283
843	0,000482	0,6679	0,3321	0,001451
859	0,000475	0,6750	0,3250	0,001460
1091	0,000380	0,7594	0,2406	0,001580
2762	0,000084	0,9596	0,0404	0,002072

Tableau.IV.11. Calcul des Fonctions de la Loi de Weibull $f(t), F(t), R(t), \lambda(t)$.

Nous proposons de comparer les résultats obtenus de la fonction de fiabilité par la loi de Weibull et celle du tableau.IV.6 par une représentation graphique :

4.2.5. Détermination de la Valeur de MTBF

La détermination de la valeur du MTBF est comme suit :

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

$$MTBF = \gamma + \eta\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

La fonction eulérienne Γ est tabulée dans le tableau numérique de la Loi de Weibull. A chaque valeur de β sont associés deux coefficients A et B tels que la durée de vie moyenne est donnée par $MTBF = A\eta + \gamma$ et que l'écart-type est donné par $\sigma = B\eta$.

Le tableau.IV.14 suivant va nous aider à calculer les différentes valeurs de **MTBF** :

β	$A = \left(\frac{1}{\beta} + \frac{1}{\beta}\right)$
0,2	120
0,25	24
0,3	9,2605
0,35	5,091
0,4	3,3234
0,45	2,4786
0,5	2
0,55	1,7024
0,6	1,5046
0,65	1,363
0,7	1,2638
0,75	1,1906
0,8	1,133
0,85	1,088
0,9	1,0522
0,95	1,0234
1	1
1,05	0,9803
1,1	0,9649

Tableau.IV.12. Table Numérique de la Loi de Weibull.

A partir de la valeur de $\beta = 0,75$ et la table numérique, la valeur du coefficient A est :
 $A = 1,1906$

$$MTBF = 235 + 534 \times 1,1906 = 871 \text{ heures.}$$

4.2.6. Exploitation des Résultats

Détermination des paramètres (β, η, γ) et le *MTBF* des ouvrages de la STEP :

Ouvrages	Paramètre β	Paramètre η	Paramètre γ	MTBF
Relevage	70	0,8	394	516
Prétraitement	33,55	1,1	552	566
Bassin Biologique	70	0,4	2248	7542
Clarificateur	235	0,75	534	871
Pompage de Boues	45	0,7	729	967
Stabilisation	2277	0,6	1516	4557
Epaississeur	-	-	-	-
Désinfection	3,82	0,4	1286	4278
Déshydratation	4,45	0,89	549	582
STEP	12,33	0,99	691	704

Tableau.IV.13. Détermination des Paramètres (β, η, γ) et *MTBF* de la Loi de Weibull des Différents Ouvrages et de la STEP.

Suite aux résultats obtenus ci-dessus on remarque que le temps moyen entre défaillances est le plus long pour *MTBF* qui correspond à 4557 heures est celui de l'ouvrage de stabilisation. On remarque aussi, une valeur du paramètre Beta β qui est entre 0,4 $\beta \leq 1,10$ ce qui signifie que l'état de dégradation des équipements de la STEP est déterminé à partir de la valeur de ce dernier.

- **Interprétation des résultats :**

$\beta < 1$: Les équipements des ouvrages dont la valeur du paramètre de forme est inférieure à 1 sont dans une période de défaut de jeunesse. On peut dire que certains équipements sont moins robustes et leur défaillance se manifeste pour des contraintes plus faibles, leur élimination ou bien leur remplacement permet de retrouver un taux de défaillance normal.

$\beta = 1, 10$: Les équipements de l'ouvrage prétraitement dont la valeur de β est égale à 1,10. Les équipements ont atteint une phase qui nécessite une maintenance corrective dans laquelle le taux de défaillance de ces derniers augmente au fil du temps.

Concernant l'état général de la Station d'Épuration de la Ville de Timgad, la valeur du paramètre de forme $\beta = 0,99$ de la STEP est dans une phase d'une vie si on peut dire utile où les pannes sont fortuites.

5. CONCLUSION

Dans ce chapitre la collecte des données a été basée sur un historique disponible de nombre des pannes observées durant les deux dernières années (2013-2014), leurs temps d'arrêt et celui de bon fonctionnement entre les pannes constatées. Nous avons présenté l'application des deux méthodes de calcul basée sur les lois probabilistes : Exponentielle et particulièrement la Loi de Weibull permettant l'estimation de la fiabilité ainsi que le temps moyen de bon fonctionnement de la population d'équipements étudiée pour chaque ouvrage.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans le cadre de la préparation de ce mémoire de magister nous concluons que le calcul de la fiabilité est l'un des facteurs fondamentaux dans le domaine de la sûreté de fonctionnement des équipements industriels. L'objectif de ce travail était d'optimiser une mesure de fiabilité pour l'adaptation d'un programme de maintenance adéquat aux équipements de chaque ouvrage de la STEP de la Ville de Timgad.

Nous avons fait appel aux principales lois continues probabilistes utilisées dans le calcul de fiabilité voir les méthodes de détermination des paramètres de fiabilité qui caractérisent le degré de défaillance et de trouver la bon programme de suivi de l'ensemble des équipements de chaque ouvrage afin de choisir le type de maintenance convenable.

En terme de perspective, nous envisagerons, après le calcul des paramètres de fiabilité dans le 4^{ème} chapitre, de mettre et de suivre un type de maintenance convenant aux fonctionnements des différents ouvrages de la STEP pour pourvoir augmenter la disponibilité des équipements et minimiser le nombre de pannes afin d'atteindre un taux de défaillance minimal.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Gilles Lasnier « Sûreté de fonctionnement des équipements et calcul de fiabilité » édition "Lavoisier"; Paris, 2011
- [2] François Monchy et Jean-Pierre Vernier « Maintenance; Méthodes et organisations » 3^e édition" Dunod"; Paris, 2000
- [3] A Villemeur « Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels; Fiabilité facteur humain » édition; "Eyrolles"; Paris, 1987
- [5] Jean Bufferne « Fiabiliser les équipements industriels » édition ; "Eyrolles, 2008
- [6] Jean Heng « Pratique de la Maintenance préventive »édition;" Dunod", Paris, 2002
- [7] ADE La Villeguerin «Etude comparative des différentes définitions du MTBF et MTTF »Publication centre de recherche EADS Aout 1999.
- [8] Amir Moukhli « Optimisation de la maintenance de roues de turbines hydroélectriques soumises à une dégradation par cavitation » Mémoire de maîtrise des sciences appliquées. Ecole Polytechnique de Montréal, 2011
- [9] Alin Gabriel Mihalache « Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques; application sur système embarqué » Engineering Sciences. Université d'Angers, 2007
- [10] Wendy Torell et Victor Avelar « Réalisation de comparatifs MTBF efficace pour l'infrastructure des centres de données » APC. Livre blanc n°12, 2005
- [11] Philippe Saint Pierre « Introduction à l'analyse des durées de survie » Cours de survie. Université Pierre et Marie Curie, Février 2014
- [12] F Palisson « Détermination des paramètres du modèle de Weibull à partir de la méthode de l'actuariat »Revue de statistique appliquée, tome 37 n°4, 1989
- [13] Boumeddane Abdelkrim « Impact de la fiabilité sur les équipements industriels; Etude de cas au niveau DETIX » Mémoire de Magister. Université Aboubaker Belkaid Tlemcen, 2012
- [14] Ouahiba Tebbi « Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés »Other, Thèse de Doctorat. Université d'Angers, 2005
- [15] Julie Berthon « Nouvelle approche de la fiabilité opérationnelle » Thèse de doctorat. Université Bordeaux II, 2008
- [16] Slah Samet et Anis Chebli « Algorithmes d'estimation des paramètres du processus de quasi-renouvellement » MOSIM'10, Hammamet, Tunisie, 2010
- [17] Roger Serra « Fiabilité et maintenance industrielle, QUA 192 » Ecole de technologie. Université du Québec, 2014
- [18] Florian Many « Combinaison des aspects temps réel et sûreté de fonctionnement pour la conception des plateformes avioniques »Thèse de doctorat. Université de Toulouse, 2013
- [19] Laurent Cauffriez « Méthode et modèle pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement de systèmes automatisés complexes » Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. Université de Valenciennes, 2005
- [20] Ali Benamar « Estimation de la fiabilité des turbines à gaz selon le modèle de Weibull » CIM'2010 Sousse. Tunisie, 2010

Site internet

<http://icbf.pagesperso-orange.fr/btsmain/cours>

<http://www.socard.fr/fiabilite>

<http://genie.coursgratuits.net/genie-industriel/maintenance-preventive>

ANNEXE A : LES METHODES DE LA MAINTENANCE

- **Maintenance Corrective**

La maintenance corrective appelée parfois curative (terme non normalisé) a pour objet de redonner au matériel des qualités perdues nécessaires à son utilisation.

Les défauts, pannes ou avaries diverses exigeant une maintenance corrective entraînent une indisponibilité immédiate ou à très brève échéance des matériels affectés et/ou une dépréciation en quantité et/ou qualité des services rendus.

- **Maintenance Préventive**

Maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dont l'objectif est de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu.

Elle doit permettre d'éviter les défaillances des matériels en cours d'utilisation. L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter.

Le but de la maintenance préventive :

- Augmenter la durée de vie des matériels.
- Diminuer la probabilité des défaillances en service.
- Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne.
- Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective.
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions.
- Éviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, de pièces détachées, etc.
- Améliorer les conditions de travail du personnel de production.
- Diminuer le budget de maintenance.
- Supprimer les causes d'accidents graves

- **Maintenance Préventive Systématique**

Maintenance préventive effectuée selon un échancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage. Même si le temps est l'unité la plus répandue, d'autres unités peuvent être retenues telles que : la quantité de produits fabriqués, la longueur de produits

fabriqués, la distance parcourue, la masse de produits fabriqués, le nombre de cycles effectués.

Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision complète ou partielle.

Cette méthode nécessite de connaître :

- Le comportement du matériel.
- Les modes de dégradation.
- Le temps moyen de bon fonctionnement entre 2 avaries

Cas d'application :

- Équipements soumis à une législation en vigueur (sécurité réglementée) : appareils de levage, extincteurs, réservoirs sous pression, convoyeurs, ascenseurs, monte-charge, etc.
- Équipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves : tous les matériels assurant le transport en commun des personnes, avions, trains, etc.
- Équipement ayant un coût de défaillance élevé : éléments d'une chaîne de production automatisée, processus fonctionnant en continu (industries chimiques ou métallurgiques).
- Équipements dont les dépenses de fonctionnement deviennent anormalement élevées au cours de leur temps de service : consommation excessive d'énergie, éclairage par lampes usagées, allumage et carburation déréglés (moteurs thermiques), etc.

- **Maintenance Préventive Conditionnelle**

Maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.).

La maintenance conditionnelle est donc une maintenance dépendante de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel. On l'appelle aussi maintenance prédictive (terme non normalisé).

Elle se caractérise par la mise en évidence des points faibles. Suivant le cas, il est souhaitable de les mettre sous surveillance et, à partir de là, de décider d'une intervention lorsqu'un certain seuil est atteint. Mais les contrôles demeurent systématiques et font partie des moyens de contrôle non destructifs.

Annexes

Tous les matériels sont concernés. Cette maintenance préventive conditionnelle se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement.

Les paramètres mesurés peuvent porter sur :

- Le niveau et la qualité de l'huile.
- Les températures et les pressions.
- La tension et l'intensité des matériels électriques.
- Les vibrations et les jeux mécaniques.

ANNEXES B : ETAT DES PANNES DES OUVRAGES DE LA STEP

- Relevage

Période		Pannes
2013	Janvier	Entretien et mise au point de la poire de niveau du trop-plein
	Février	Intervention de nettoyage et réparation mécanique d'une pompe
		Ajustage et réglage de la barre de guidage d'une pompe
	Mars	Intervention de nettoyage et réparation mécanique de la pompe
		Emplacement d'un nouveau robinet pour la conduite de l'eau de service
	Avril	Déblocage mécanique de la pompe
	Mai	Mise hors service d'une pompe pour contrôle
	Juin	Déblocage d'une pompe
Octobre	Mise hors service d'une pompe pour contrôle	
Novembre	Déblocage mécanique d'une pompe	
2014	Janvier	Confection d'un filet galvanisé pour le panier dégrilleur
		Démontage et nettoyage des clapets anti retour
		Ajustage des switcher flotteurs
	Février	Démontage et montage des clapets anti retour
		Confection et emplacement des joints pour les clapets
		Ajustage des switcher flotteurs
	Mars	Démontage et montage des clapets anti retour
		Montage d'une nouvelle vanne des eaux de service
		Démontage et nettoyage des clapets anti retour
	Avril	Déblocage mécanique de deux pompes
		Mise hors service de la pompe pour contrôle
	Juin	Déblocage mécanique de deux pompes
		Remplacement de deux relais des deux armoires de commande des pompes
	Juillet	Déblocage mécanique de la pompe
		Renouvellement du tamis de dégrilleur
	Aout	Déblocage mécanique d'une pompe
		Démontage et montage des clapets anti retour
	Septembre	Renouvellement du tamis de dégrilleur
		Ajustage des switcher flotteurs
	Octobre	Déblocage mécanique d'une pompe
Confection d'un nouveau dégrilleur		
Emplacement d'un nouveau disjoncteur 380 V/63 A		
Novembre	Déblocage mécanique d'une pompe	
	Nettoyage des clapets anti retour des pompes	
	Mise en place de l'installation électrique	
Décembre	Déblocage mécanique d'une pompe	
	Emplacement d'un nouveau contacteur 380 V	

Annexes

- **Prétraitement**

- 1- **Dégrilleurs (Grossier et Fin)**

	Période	Pannes
2013	Janvier	Démontage du porte relais 230v de la vis compacteuse 221-AFP-00
		Déviation des eaux pompées par les pompes à sables vers le canal by-pass récupération de sables.
	Février	Déblocage, réglage et ajustage de la vis compacteuse des dégrilleurs grossier.
		Emplacement d'un porte relais 230 v de la vis compacteuse 221-AFP-00.
		Déviation des eaux pompées par les pompes à sables vers le canal by-pass récupération de sables.
	Mars	Déblocage des dégrilleurs fin
		Déviation des eaux pompées par les pompes à sables vers le canal by-pass récupération de sables.
	Avril	Déviation des eaux pompées par les pompes à sables vers le canal by-pass récupération de sables.
	Mai	Démontage et Réparation du motoréducteur de la vis d'extraction du laveur de sable
	Juin	Déblocage de la vis compacteurs de dégrilleurs grossier.
	Juillet	Déblocage de la vis compacteuse de dégrilleurs grossier.
	Aout	Déblocage de la vis compacteuse de dégrilleurs grossier.
	Septembre	Réglage de la buté de fin de course pour le dégrilleur grossier et déblocage de la vis
Réparation du convoyeur de sable et du motoréducteur		
Octobre	Suivi de la marche de classificateur de sable, après la réparation	
	Réparation de l'électrovanne de laveur classificateur des sables	
Novembre	Déblocage de la vis transporteuse de sables vérification des réducteurs	
Décembre	Déblocage de la vis compacteuse des dégrilleurs grossiers.	
	Contrôle visuel de l'huile industrielle pour tous les réducteurs	
2014	Février	démontage et réparation de l'électrovanne des eaux de services du laveur classificateur des sables
		Déblocage de la vis compacteuse de dégrilleur grossier
	Mars	Réparation de bouton poussoir (marche) de dégrilleur grossier n°2
		Déblocage de la vis compacteuse des dégrilleurs fins
	Avril	Déblocage de la vis compacteuse des dégrilleurs grossiers
	Mai	Démontage et nettoyage de l'électrovanne
		Déblocage de la vis compacteuse des dégrilleurs grossiers
	Juin	Déblocage mécanique de la vis du convoyeur compacteur dégrilleur grossier
	Juillet	Déblocage mécanique du dégrilleur fin
		Déblocage de la vis compacteuse des dégrilleurs gros
	Aout	Déblocage mécanique de la vis compacteuse et des dégrilleurs grossier
	Septembre	Montage du bouton (marche/arrêt) pour le laveur de sable
Novembre	Déblocage de la vis compacteuse	
Décembre	Déblocage mécanique de dégrilleur fin	

2- Désableur, Déshuileur

Période		Pannes
2013	Janvier	Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable 225-1-APS-01 et 225-2-APS-01
		Resserrage des boulons de l'arbre de transmission principale.
	Février	Désactivation de l'arrêt d'urgence du pont racleur (remise en marche)
		Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable 225-1-APS-01 et 225-2-APS-01
	Mars	Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable 225-1-APS-01 et 225-2-APS-01
		Débloccage du pont racleur (remise en marche)
	Avril	Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable 225-1-APS-01 et 225-2-APS-01
	Mai	Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable 225-1-APS-01 et 225-2-APS-01
		Réparation et vérification des racleurs de surface
	Juin	Redressement du câble d'enrouleur du pont racleur
		Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable 225-1-APS-01 et 225-2-APS-01
	Juillet	Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable 225-1-APS-01 et 225-2-APS-01
Aout	Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable 225-1-APS-01 et 225-2-APS-01	
Septembre	Réparation et Nettoyage des pompes à sable	
	Réparation et Débloccage du racleur de surface et de fond.	
Octobre	Réparation et Nettoyage des pompes à sable.	
	Paramétrage de la temporisation du pont.	
Novembre	Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable	
Décembre	Réparation et Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable.	
2014	Janvier	Débloccage mécanique du moteur de racleur de fond
		Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable
	Février	Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable
	Mars	Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable
	Avril	Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable
	Mai	Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable
	Juillet	Réparation et réglage des racleurs de surface et de fond
		Réparation et Nettoyage de la pompe à sables 221.2-APS-01
	Juin	Réparation et réglage des racleurs de surface et de fond
	Septembre	Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable
		Réparation et réglage des racleurs de surface et de fond et changement d'un switcher
	Octobre	Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable
		Réparation et réglage des racleurs de surface et de fond et changement d'un switcher
	Novembre	Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable
Changement de switcher de fin de course		
Décembre	Changement de câble de manutention du racleur de sable	
	Nettoyage des clapets anti retour des pompes à sable	

Annexes

- Bassin Biologique

Période		Pannes
2013	Janvier	Vidange de la filière 1 du bassin et Emplacement de la moto pompe diesel 500 m ³ /H
	Mars	Démontage de la soupape de sécurité du supprimeur 255-ABB-01
	Juillet	Emplacement de la soupape de sécurité pour supprimeur d'air 225-ABB-01
	Septembre	Jonction du câble de commande de l'agitateur 248-AMH-00.
	Octobre	Montage des diffuseurs d'air dans le bassin d'aération de la deuxième filière.
Emplacement de l'agitateur du bassin sélecteur 248.1- AMH-01		
2014	Décembre	Changement de cinq nouveaux des diffuseurs d'air

- Clarificateur

Période		Pannes
2013	Janvier	Ajustage partielle des lames du clarificateur
	Février	Changement d'un voyant.
	Mars	Confection d'un joint pour le racleur de surface
	Avril	Ajustage des contre poids de la brosse nettoyante
	Mai	Ajustage du racleur de surface
	Novembre	Confection d'un joint pour le racleur de surface
	Décembre	Réparation de la brosse roulante du deuxième clarificateur
2014	Janvier	Emplacement d'un joint d'étanchéité pour la lame du clarificateur
	Avril	Serrage des écrous de la tige de conduite de siphonage du premier clarificateur
	Mai	Déblocage du pont N°1
		Montage de la pompe à vide pour le siphonage.
Juin	Acquittement électrique du clarificateur et Contrôle général du coffret de commande	

Annexes

- **Pompage des Boues**

	Période	Pannes
2013	Janvier	Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
	Février	Vérification et contrôle et Nettoyage des deux pompes des boues de retour réparé
		Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
		Démontage des vannes et débouchage de la conduite (conduite colmatée par la boue)
	Mars	Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
	Avril	Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
	Mai	Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
	Juin	Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
	Juillet	Élimination de la vibration de la pompe 441-APS-02
		Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
	Aout	Emplacement de la pompe des boues de retour réparée
		Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
	Septembre	Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
	Octobre	Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
Réparation de la pompe 441-APS-00		
Novembre	Déblocage mécanique de la pompe 441-APS-02	
2014	Janvier	Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
		Réparation et bobinage des pompes de boues de retours
	Février	Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
		Réparation et Rembobinage et Contrôle des pompes de boues de retour 441-APS-01
	Mars	Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
		Changement de la griffe de maintien de la pompe des boues en excès 441-APS-04
	Avril	Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
	Mai	Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
	Juillet	Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
	Septembre	Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
		Mise hors service des pompes 441-APS-01 et 441-APS-02 pour contrôle
	Octobre	Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
	Novembre	Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours
Décembre	Nettoyage des clapets anti retour des pompes de boues en excès et de retours	

- **Epaississeur**

Période		Pannes
2013	Mars	Ajustage de la lame de l'épaississeur

2. Stabilisateur

Période		Pannes
2013	Septembre	Changement d'un connecteur de phase
2014	Janvier	Changement du bouton poussoir d'arrêt
	Avril	Entretien générale du premier aérateur

- **Désinfection**

Période		Pannes
2013	Janvier	Réglage de la pression des pompes d'eaux industrielles
	Septembre	Emplacement d'un connecteur de phase pour le variateur de fréquence de la pompe N°2
	Octobre	Réparation d'une fuite sur la conduite de refoulement
		Contrôle de la pression
Novembre	Réglage de la pression du groupe hydrophore	
2014	Janvier	Réparation de la carte électronique d'alimentation du groupe hydro-fort
		Réglage de la pression des pompes
	Avril	Montage de l'air-manageur de l'échantillonneur de sortie
	Mai	Montage d'une nouvelle conduite d'aspiration pour l'échantillonneur
	Juin	Vérification et contrôle du fonctionnement de la station de dosage 195-APC-00 et 195-APC-01
		Réglage du problème de dosage des prélèvements de l'échantillonneur de sortie
Juillet	Contrôle général de la station des eaux de services	

Annexes

- **Déshydratation**

Période		Pannes
2013	Janvier	Confection et montage des joints d'étanchéité pour la brosse laveuse 1et 2
		Ajustage des capteurs de guidage des bandes.
	Février	Confection et montage d'un joint d'étanchéité
	Mars	Intervention mécanique sur le vérin de guidage de la bande
	Avril	Intervention et réparation du capteur pneumatique de guidage de la bande
	Mai	Equilibrage de la bande de la machine.
		Confection et montage d'un joint pour la station de polymère.
	Juin	Equilibrage de la bande de la machine.
		Réparation de l'inverseur pneumatique
	Juillet	Réparation du distributeur pneumatique des vérins de régulation de la bande.
Ajustage de la bande transporteuse des boues		
Septembre	Débouchage de l'électrovanne (station de dosage de polymère)	
Novembre	Débouchage de la conduite des eaux de services qui alimente la station de dosage de polymère	
	Réglage et ajustage de la bande transporteuse	
2014	Janvier	Emplacement d'un nouveau tuyau de pression pour le vérin pneumatique
		Emplacement d'un joint d'étanchéité dans la partie d'accumulation de boues déshydratées
	Mars	Lubrification de motoréducteur MSB11 de filtre presse à bandes
		Changement de courroie de compresseur d'air
	Avril	Emplacement des nouveaux fusibles au niveau de l'armoire de départ.
		Changement des files électrique.
		Test et contrôle de tous les disjoncteurs et les relais de l'armoire de commande locale
	Mai	Entretien et réparation de l'inverseur pneumatique
Réglage de la bande principale du filtre presse à bandes.		
Fixation de la conduite de drainage de la machine.		
Juillet	Changement d'un relais 24 v de la station de dosage des polymères	

Annexes

ANNEXE C : CALCUL DES FONCTIONS ET PARAMETRES ($\gamma, \beta, \eta, MTBF$) DE LA LOI DE WEIBULL POUR LES OUVRAGE DE LA STEP

- Relevage ($\gamma = 70, \beta = 0,8, \eta = 394, MTBF = 516$).

Ordre i	Temps de Bon Fonctionnement Trié TBF_i en heures	Nombre de pannes n_i	Nombre de pannes Cumulés n_i	Fonction de Fiabilité Cumulée $F(i) = \frac{\sum_{j=1}^i n_j}{N+1}$	Fonction de Fiabilité $R(i) = 1 - F(i)$
1	72	1	1	0,026	0,974
2	87	1	2	0,053	0,947
3	93	1	3	0,079	0,921
4	105	1	4	0,105	0,895
5	133	1	5	0,132	0,868
6	147	1	6	0,158	0,842
7	149	1	7	0,184	0,816
8	163	1	8	0,211	0,789
9	167	1	9	0,237	0,763
10	174	1	10	0,263	0,737
11	203	1	11	0,289	0,711
12	207	1	12	0,316	0,684
13	238	1	13	0,342	0,658
14	249	1	14	0,368	0,632
15	272	1	15	0,395	0,605
16	273	1	16	0,421	0,579
17	301	1	17	0,447	0,553
18	304	1	18	0,474	0,526
19	307	1	19	0,500	0,500
20	313	1	20	0,526	0,474
21	338	1	21	0,553	0,447
22	405	1	22	0,579	0,421
23	415	1	23	0,605	0,395
24	434	1	24	0,632	0,368
25	438	1	25	0,658	0,342
26	471	1	26	0,684	0,316
27	477	1	27	0,711	0,289
28	547	1	28	0,737	0,263
29	551	1	29	0,763	0,237
30	566	1	30	0,789	0,211
31	567	1	31	0,816	0,184

Annexes

32	653	1	32	0,842	0,158
33	709	1	33	0,868	0,132
34	1039	1	34	0,895	0,105
35	1313	1	35	0,921	0,079
36	1424	1	36	0,947	0,053
37	2900	1	37	0,974	0,026

- Bassin Biologique ($\gamma = 70, \beta = 0,4, \eta = 2248, MTBF = 7542$)

Ordre i	Temps de Bon Fonctionnement Croissant trié TBF en heures	Nombre de pannes n_i	Nombre de pannes Cumulés n_i	Fonctionnement Cumulé $F(i) = \frac{(n_i - 0,4)}{(N + 0,4)}$	Fiabilité $R(i) = 1 - F(i)$
1	72	1	1	0,095	0,905
2	320	1	2	0,230	0,770
3	767	1	3	0,365	0,635
4	1674	1	4	0,500	0,500
5	1834	1	5	0,635	0,365
6	4138	1	6	0,770	0,230
7	10030	1	7	0,905	0,095

- Stabilisateur ($\gamma = 2277, \beta = 0,6, \eta = 1515, MTBF = 4557$)

Ordre i	Temps de Bon Fonctionnement Croissant trié TBF en heures	Nombre de pannes n_i	Nombre de pannes Cumulés n_i	Fonctionnement Cumulé $F(i) = \frac{(n_i - 0,4)}{(N + 0,4)}$	Fiabilité $R(i) = 1 - F(i)$
1	2406	1	1	0,206	0,794
2	2961	1	2	0,500	0,500
3	5910	1	3	0,794	0,206

- Epaisseur

Ordre i	Temps de Bon Fonctionnement Croissant trié TBF en heures	Nombre de pannes n_i	Nombre de pannes Cumulés n_i	Fonctionnement Cumulé $F(i) = \frac{(n_i - 0,4)}{(N + 0,4)}$	Fiabilité $R(i) = 1 - F(i)$
1	86	1	1	-	-

Annexes

- Désinfection ($\gamma = 3,82. \beta = 0,4. \eta = 1286. MTBF = 4278$)

Ordre i	Temps de Bon Fonctionnement Croissant trié en heures	Nombre de pannes n_i	Nombre de pannes Cumulées n_i	Fonction de Fiabilité Cumulée $F(i) = \frac{(n_i - 0,5)}{(N + 0,5)}$	Fonction de Fiabilité $R(i) = 1 - F(i)$
1	4	1	1	0,056	0,944
2	11	1	2	0,137	0,863
3	285	1	3	0,218	0,782
4	528	1	4	0,298	0,702
5	538	1	5	0,379	0,621
6	540	1	6	0,460	0,540
7	800	1	7	0,540	0,460
8	868	1	8	0,621	0,379
9	885	1	9	0,702	0,298
10	1654	1	10	0,782	0,218
11	1845	1	11	0,863	0,137
12	5506	1	12	0,944	0,056

Annexes

- Déshydratation ($\gamma = 4,43$, $\beta = 0,9$, $\eta = 554$, $MTBF = 587$)

Ordre i	Temps de Bon Fonctionnement Croissant trié TBF_i en heures	Nombre de pannes n_i	Nombre de pannes cumulé N_i	Fonction de Fiabilité Cumulée $F(i) = \frac{\sum_{j=1}^i n_j}{N}$	Fonction de Fiabilité $R(i) = 1 - F(i)$
1	9	1	1	0,038	0,962
2	27	1	2	0,077	0,923
3	116	1	3	0,115	0,885
4	120	1	4	0,154	0,846
5	149	1	5	0,192	0,808
6	152	1	6	0,231	0,769
7	153	1	7	0,269	0,731
8	161	1	8	0,308	0,692
9	179	1	9	0,346	0,654
10	199	1	10	0,385	0,615
11	328	1	11	0,423	0,577
12	335	1	12	0,462	0,538
13	366	1	13	0,500	0,500
14	378	1	14	0,538	0,462
15	430	1	15	0,577	0,423
16	482	1	16	0,615	0,385
17	598	1	17	0,654	0,346
18	629	1	18	0,692	0,308
19	923	1	19	0,731	0,269
20	944	1	20	0,769	0,231
21	1090	1	21	0,808	0,192
22	1135	1	22	0,846	0,154
23	1145	1	23	0,885	0,115
24	1251	1	24	0,923	0,077
25	1688	1	25	0,962	0,038

ANNEXE D : LES CARACTERISTIQUES DE LA STEP DE TIMGAD

• **La capacité de la STEP**

La capacité de la station en équivalent habitant est :

- 13800 équivalents habitants à l'horizon 2018
- 23083 équivalents habitants à l'horizon 2033
- A partir de l'horizon 2033 une extension est obligatoire

• **La charge hydraulique admissible de la STEP**

Les débits maximaux prise en charge par la station actuellement sont :

- Débits moyen par jour (24h/j) = $1950 \text{ m}^3/\text{j}$ soit 22,56l/s.
- Débit maximal temps sec = $162 \text{ m}^3/\text{h}$, soit 45l/s.
- Débit maximal en temps du pluie = $243 \text{ m}^3/\text{h}$, soit 67,5 l/s.
- Débit mini pour fonctionnement = $500 \text{ m}^3/\text{j}$ soit 5,79 l/s.
- Débit de pointe rejetée par la ville de Timgad actuellement = 37,32 l/s.

• **La charge de pollution prise en compte par la STEP de Timgad**

La charge de pollution admissible au niveau de la STEP soit énumérée dans le tableau Ci-dessous :

Tableau N°01 :

Paramètre	Charge entrée STEP Kg/jours	Concentration
MES	1071	549
DBO₅	828	425
DCO	1656	849
NTK	125	64
N-NH₄	95	49
N-org	/	15
N-NO₃	/	2
P-PO₄	25	13

Si la charge d'entrée à la STEP dépasse ces valeurs, l'effluent dévier vers l'oued sera rejeté vers l'exutoire (Oued Sultz).

Annexes

La qualité des eaux traitées : les eaux usées épurées les concentrations max suivant :

Tableau N°02 :

Paramètre	La concentration en mg/l
MES	35
DBO₅	25
DCO	125
NTK	7
N-NH₄	5
N-org	2
N-NO₃	10
P-PO₄	2

Tableau N°03 :

Les limites admissibles des Ph, conductivité et le débit dans la STEP

Paramètre	Limite admissible
Conductivité	900-1300 μm
Ph	65-8.5
Le débit	500-1950 m³/j

ANNEXE E : DESCRIPTION DES DIFFERENTS OUVRAGES DE LA STEP DE TIMGAD

Dans le concept général du processus de traitement, les éléments de la station d'épuration de Timgad utilisés forment la chaîne de traitement suivante :

- Une station de relevage
- Prétraitement
- Bassin biologique (bassin anaérobie, bassin anoxie, bassin aérobie)
- Décantation secondaire (clarificateur)
- Le bassin de la désinfection
- Station de pompage de boues recyclées et de boues activées en excès
- Epaissement des boues
- Stabilisation anaérobie des boues
- Déshydratation mécanique et stockage des boues

- **Station de Relevage**

Tableau N°01 :

Caractéristiques de la station de relevage :

Volume du bassin	8,9m³
Dimension (L x lxH)	2.1 x 2.5 x 1.7
Débit maximal unitaire	250 m³/h
HMT	15

- **Prétraitement**

1- Dégrillage Mécanisé Grossier

Tableau N°02 :

Caractéristiques de dégrillage mécanisé grossier :

Nombre des lignes	2 en service
Capacité par ligne	250 m³/h
Espace entre les barreaux	30mm
Largeur du canal	0.5 m
Profondeur du canal	1 m
Vitesse de circulation de l'effluent	0.63/s

2- Dégrillage Mécanisé Fin

Tableau N°03 :

Caractéristiques de dégrillage mécanisé fin

Nombre des lignes	2 en service
Capacité par ligne	250 m³/h
Espace entre les barreaux	6 mm
Largeur du canal	0.5 m
Profondeur du canal	1.4 m
Vitesse de circulation de l'effluent	0.63 m/s

3- Dessablage –Déshuilage

Tableau N°04 :

Caractéristiques de Dessablage /Déshuilage

Nombre des lignes	1 en service + 1 en secours
Capacité par ligne	250 m³/h
Largeur	1.2m
Longueur	12.5 m
Profondeur	1.85 m
Temps de séjour	0.37 j

4- Pompe à Sable

Tableau N°05 :

Caractéristiques de pompe à sable

Nombre de pompes	2
Type de pompes	Submersible
Débit maximal unitaire	20 m³/h
Hauteur de relèvement	8 m

5- Classificateur à Sable

Tableau N°06 :

Caractéristiques de classificateur à sable

Nombre de classificateur	1
Capacité entrant mélange eau/sable	20 m³/h
Volume du conteneur de sable	5 m³

• **Caractéristique du Bassin Biologique**

1- Bassin Anaérobie

Tableau N°07 :

Caractéristique du bassin biologique (Anaérobie)

Bassin biologique (Anaérobie)	Caractéristique
Forme du bassin	Rectangulaire
Longueur	30m
Largeur	8m
Profondeur d'eau	4.5m
Temps de séjour	0.9 jours (12-21h)
Bassin anaérobie	Caractéristique
Nombre de bassin	1
Volume par bassin	250 m³

Tableau N°08 :

Caractéristique de bassin Anaérobie

Le nombre du bassin	Le volume	Nombre d'agitateur
Un seul bassin	250 m³	1 agitateurs submersibles

2- Bassin Anoxique-Aérobique

Tableau N°09 :

Caractéristique du bassin biologique (Anoxique-Aérobique)

Bassin biologique (Anoxique-Aérobique)	Caractéristique
Nombre de bassin	2
Volume totale	2160 m³
Volume par bassin (anoxique-aérobique)	1080 m³
Volume zone anoxique	430 m³
Volume zone aérobique	650m³

Tableau N°10 :

Les caractéristiques du bassin (Anoxique-Aérobique)

Le volume du bassin (m³) (L x l x h)	1080 x 8.4 x 5.30
L'aération	Fines bulles d'oxygène 2.5 a 3mg/l
Le nombre d'agitateur	2 agitateurs submersibles
L'âge des boues (jour)	Entre 12-15
La concentration des boues (g/l)	5

- **Clarificateurs**

Tableau N°11 :

Caractéristiques clarificateurs

Nombre de clarificateurs	2
Diamètre (m)	16 m
Type racleur	Racleur d'aspiration (demi-diamètre)avec fond plat
Volume par bassin (m³)	794m³
Surface raclée par tour (m²)	170m²
Profondeur d'eau au 2/3du diamètre	3.95

- **Bassin de Désinfection**

Tableau N°12 :

Dimensionnement du bassin désinfection

Le nombre des bassins	Longueur	Largeur	Profondeur	Temps de séjour	Volume
01	12m	9m	2.96m	1.3h	320m³

- **Epaississement des Boues**

Tableau N°13 :

Caractéristiques de l'épaississeur

Type	Circulaire
Nombre de clarificateurs	1
Volume par bassin (m³)	190 m³
Temps de séjour (jour)	1.7
Diamètre (m)	16m
Profondeur	4m

- **Stabilisation des Boues**

Tableau N°14 :

Caractéristiques du bassin de stabilisation

Type	Rectangulaire
Nombre de bassin	2
Volume par bassin (m³)	230 m³
Temps de séjour (jour)	13.6
Longueur (m)	8.9m
Largeur (m)	8.9m
Profondeur	3m