الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Médéa

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie des Procédés et Environnement

Autorisation de soutenance N° : 78 /2016

Thèse de Doctorat

Spécialité : Génie des procédés

Présentée par

DJEDDI Ahmed Zohair

Sujet

Étude de fiabilité et de disponibilité des systèmes des turbines à gaz : Contribution et applications

---

Soutenue publiquement, le 22 Mai 2016, devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement de rattachement	Désignation
Pr Smail KOUADIK	Professeur	Université de Médéa	Président
Dr Ahmed HAFAIFA	MCA	Université de Djelfa	Directeur de thèse
Pr Abudura Salam	Professeur	Université de Médéa	Co Directeur de thèse
Pr HANINI Salah	Professeur	Université de Médéa	Examinateur
Pr Kamal MOHAMMEDI	Professeur	Université de Boumerdès	Examinateur
Dr KOUADRI MOUSTEFAI Soumia	MCA	Université de Chlef	Examinatrice

Université de Médéa, 2016

Dédicaces

Je dédie cette thèse

A la mémoire de mon défunt père,

A ma chère mère,

A mes frères et sœurs,

A toute ma famille,

A tous mes amis,

A ceux qui m'ont soutenu durant ces années de thèse.

Remerciements

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à mon directeur de thèse, **Monsieur Ahmed HAFAIFA**, en acceptant de rapporter ce travail, et pour sa disponibilité et ces encouragements. Ainsi que pour mon Co-Directeur de thèse, **Monsieur Abudura SALAM** à qui j'exprime mes respects les plus profond vis à vis son aide.

Tous mes remerciements également à **Monsieur Smail KOUADIK**, Professeur à l'Université de Médéa, pour avoir accepté d'examiner mon travail et de présider le jury. Je suis profondément reconnaissant de sa participation à ce jury de thèse. Aussi, J'exprime toute ma gratitude à **Monsieur Kamal MOHAMMEDI**, Professeur à l'Université de Boumerdès et à **Monsieur Salah HANINI**, Professeur à l'Université de Médéa et à **Madame KOUADRI MOUSTEFAI Soumia**, Maître de conférences à l'Université de Chlef, pour avoir accepté de participer au jury.

Enfin, je voudrais remercier tous ceux qui m'ont aidé, soutenu et encourager durant ces années de thèse.

ملخص:

حاليا، وموثوقية حقل توفر مجموعة من الأدوات القوية لتحسين عمليات عمل المعدات الصناعية. ومع ذلك، يستند الاعتماد على العمليات الصناعية على تطوير أدوات لتقدير عملية التحلل في هذه النظم وتوافرها. وفي هذا السياق الذي يناسب عمل هذه الأطروحة إلى تطوير واستكشاف نهج الموثوقية تطبيقها على توربينات الغاز واقتراح توزيعات جديدة في تصميم نموذج لأفضل نظام تدهور التوربينات الغاز، لزيادة سلامة وللاستدلال القرارات المستقبلية التي تؤثر على حالة التشغيل للمعدات الصناعية. وقد وضعت مصلحة النهج المقترح في هذا البحث نموذجا قويا من الموثوقية والكفاءة قدر الإمكان لتوربينات الغاز وضمان ربحيتها. في الواقع الصناعي وتحليل وتقييم المناهج الموثوقية توربينات الغاز يهدف إلى تجنب الفشل والضرر، من أجل زيادة توافر وتسمح له أن يكون إنتاجية جيدة.

Abstract

Currently, the reliability field provides a set of robust tools to optimize the operations of industrial equipment operations. However, the reliability of industrial processes is based on the development of tools for the estimation of the degradation process in these systems by the analysis of their availability. It is in this context that fits the work of this thesis to develop and explore the reliability approaches applied to gas turbines and propose new distributions to model the degradation in gas turbine system, to increase their safety and to infer future decisions affecting the operating state of the industrial equipment. The interest of the approach proposed in this thesis was developed a robust model of reliability, as efficient as possible for gas turbines and ensure their profitability. In industrial reality, analysis and evaluation of gas turbine reliability approaches is designed to avoid failures and damage, in order to increase their availability and allow him to have a good productivity.

Résumé

Actuellement, le domaine de fiabilité fournit un ensemble d'outils solides pour optimiser les opérations d'exploitations des équipements industriels. Cependant, la fiabilité des processus industriels est basée sur le développement d'outils permettant l'estimation du processus de dégradation dans ces systèmes et l'analyse de leurs disponibilités. C'est dans ce cadre, que s'inscrit les travaux de cette thèse pour l'élaboration l'exploration des approches de fiabilité appliquées à des turbines à gaz et de proposer des nouvelles outils pour modéliser au mieux la fiabilité de système de turbine à gaz, afin d'augmenter leurs sûreté et pour déduire les futures décisions, affectant l'état de fonctionnement de cet équipement industriel. L'intérêt de l'approche proposé dans ce travail de thèse à été d'établir un modèle robuste de fiabilité, le plus performant possible pour les turbines à gaz et de garantir leurs rentabilités. En réalité industrielle, l'analyse et l'évaluation des approches de fiabilité des turbines à gaz est conçus pour éviter les défaillances et les endommagements imprévues de ces systèmes, dans le but d'augmenter leurs disponibilités et de leurs permettre d'avoir une bonne productivité.

Mots clés : Fiabilité, Disponibilité, Pétrole et gaz, modélisation de la fiabilité, Weibull ,Turbine à gaz.

Liste des Travaux

Publication cité

[1]. Ahmed Zohair Djeddi, Ahmed Hafaifa, Abudura Salam, Gas turbine reliability model based on tangent hyperbolic reliability function. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, vol 53, no. 3, pp. 723-730.

Conférence Internationale

[2]. Ahmed Zohair Djeddi, Ahmed Hafaifa, Abudura Salam and Mouloud Guemana, Reliability estimation in industrial process using Log-normal distribution: Gas turbine application. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY SYSTEMS ISTANBUL 2015 - ICES2015, 23-25 December 2015, Istanbul-Turkey.

TABLE DES MATIÈRES

Liste des Travaux ..... E

Liste des Figures ..... J

Liste des Tableaux ..... M

Introduction Générale 14

CHAPITRE I: Système de turbine à gaz Industrielle 17

I. Introduction 18

I.2. Fonctionnement des turbines à gaz 19

I.3. Eléments principaux d'une turbine a gaz 19

I.3.1. Compresseur 19

I.3.2. Section de combustion 20

I.3.3. Section de la turbine 21

II.4. Principe de fonctionnement 22

I.5. Types de turbines à gaz 23

I.6. Maintenance des turbines à gaz 25

I.6.1. Interface logicielle des commandes et l'affichage des données 26

I.6.1. Module de vibration de la turbine 26

I.6.2. Module de vibration de l'unité entraînée 26

I.6.3. Affichage graphique 26

I.7. Exemple : turbine Titan 130 27

I.8. Domaine d'utilisation des turbines à gaz 29

I.8.1. Production d'électricité 29

I.8.2. Pompage et compression de gaz 29

I.8.3. Autre application 30

I.9. Intérêt d'étude de la fiabilité des turbines a gaz 30

I.9.1. Fiabilité opérationnelle et fiabilité prévisionnelle 31

I.10. Redondance 33

I.10.1. Redondance active 33

I.10.2. Redondance passive 33

I.11. Conclusion 34

CHAPITRE II: Concepts de Fiabilité Industrielle 35

II.1. Introduction 36

II.2. Définition et terminologies 37

II.2.1. Définition de fiabilité 37

II.2.2. Définition de maintenabilité..... 37
II.2.3. Définition de disponibilité..... 37
II.2.4. Système, assemblages et éléments..... 38
II.2.5. Systèmes..... 40
II.2.6. Défaillances..... 42
II.2.7. Défaut..... 43
II.3. Mesures pour les systèmes non réparables..... 44
II.3.4. Taux de défaillance 45
II.3.5. Taux de défaillance cumulé..... 47
II.4. Mesures pour les systèmes réparables..... 47
II.4.1. Durées de réparation comptabilisées 47
II.4.2. Maintenabilité..... 48
II.4.3. Taux de réparation..... 48
II.4.4. Temps moyenne de réparation 48
II.4.5. Fiabilité des systèmes réparables..... 49
II.4.6. Durée moyenne entre deux défaillances 49
II.4.7. Disponibilité des systèmes réparables..... 49
II.4.8. Durées de réparation non comptabilisées..... 49
II.5. Processus de comptage des défaillances..... 51
II.5.1. Fiabilité avec un processus de comptage des défaillances..... 51
II.5.2. Intensité de défaillance..... 52
II.5.3. Fonction moyenne..... 52
II.6. Fiabilité des systèmes série complexes..... 52
II.6.1. Fiabilité d'un système série 53
II.6.2. Fiabilité d'un système parallèle 53
II.6.3. Fiabilité d'un système hybride série et parallèle..... 53
II.7. Modèles de fiabilité usuels..... 54
II.7.1. Loi exponentielle..... 54
II.7.2. La loi de Weibull..... 55
II.7.3. La loi normale..... 55
II.7.4. Loi log normale..... 56
II.7.5. Loi Gamma..... 56
II.7.6. Loi Bêta..... 57
II.7.7. Loi uniforme..... 57
II.7.8. Autres lois..... 57

II.8. Analyses de fiabilité qualitatives..... 57
II.9. Méthodes d'estimation des paramètres des lois de fiabilité..... 58
II.10. Méthode de régression et la méthode du maximum de vraisemblance..... 58
II.11. Conclusion..... 59
CHAPITRE III: Fiabilité d'une turbine à gaz avec les approches usuelles..... 60
III.1. Introduction..... 61
III.2. Loi Exponentielle 62
III.2.1. Graphe normalise de Nelson-Aalen 63
III.2.2. Détermination des paramètres..... 64
III.2.3. Fonction de répartition 66
III.2.4. Taux de défaillance..... 68
III.2.5. Fonction de distribution 68
III.3. Distribution normal..... 69
III.3.1. Détermination des paramètres..... 70
III.3.2. Fonction de répartition 71
III.4. Loi normale tronquée..... 76
III.4.1. Détermination des paramètres..... 77
III.4.2. Fonction de répartition 77
III.4.3. Taux de défaillance..... 79
III.5. Distribution Log Normale..... 80
III.5.1. Détermination des paramètres..... 81
III.5.2. Fonction de répartition et fonction de survie..... 83
III.5.3. Taux de défaillance..... 84
III.6. Distribution de Weibull..... 87
III.7. Weibull à trois paramètres..... 91
II.8. Conclusion..... 94
CHAPITRE IV: Fiabilité de système de turbine à gaz..... 95
IV.1. Introduction 96
IV.2. Modèle à fonction tangente hyperbolique..... 96
IV.2.1. Fonction de répartition du modèle..... 97
IV.2.2. Fonction de risque et fonction de densité..... 99
IV.3. Application de modèle tangente hyperbolique sur une turbine à gaz..... 101
IV.3.1. Estimation des paramètres..... 101
IV.3.2. Calcul du MTBF..... 108
IV.4. Modèle à fonction du taux défaillance en forme de baignoire..... 108

IV.5. Modèle de Weibull modifié proposé 110
IV.5.1. Traçage de probabilité..... 111
IV.5.2. Détermination des paramètres..... 112
IV.5.3. Application numérique..... 114
IV.6. Application du modèle de Weibull modifié proposé à une turbine à gaz 118
IV.6.1. Détermination des paramètres..... 118
IV.7. Conclusion..... 121
Conclusion générale 122
Bibliographies..... 125

Liste des Figures

Figure I.1 : Compresseur axial de la turbine à gaz de type GE..... 20
Figure I.2 : Chambres de combustion de la turbine à gaz de type GE..... 21
Figure I.3 : Roues pour la transformation d'énergie d'une turbine à gaz de type GE..... 21
Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'une turbine à gaz..... 22
Figure I.5 : Variations de pression et de température dans les différentes sections de la turbine 23
Figure I.6: Turbines à gaz à un arbre et à deux arbres..... 24
Figure I.7: Variation de capacité de fonctionnement 24
Figure I.8 : Interface de surveillance d'une turbine gaz..... 26
Figure I.9: Turbine à gaz Titan 130 27
Figure I.10: Méthodologie de la recherche de la fiabilité 31
Figure I.11: Procédure de fiabilité opérationnelle et de fiabilité prévisionnelle..... 32
Figure II.1: Configuration de la hiérarchie de la conception 41
Figure II.2: Taux de défaillance..... 46
Figure II.3: Durées de bon fonctionnement et de réparation..... 48
Figure II.4: Processus de défaillance d'un système réparable..... 50
Figure II.5: Système en série..... 53
Figure II.6: Système en parallèle..... 53
Figure II.7: Système hybride série et parallèle..... 54
Figure III.1: Graphe TTT des données de fiabilité d'une turbine à gaz examinée..... 64
Figure III.2: Tracé de probabilité de Weibull de la turbine à gaz examinée..... 65
Figure III.3: Fonction de répartition de la distribution Exponentielle de la turbine à gaz examinée..... 66
Figure III.4: Courbe de densité de loi Exponentielle et le taux de défaillance de turbine à gaz examinée..... 68
Figure III.5: Courbe de densité de la loi Exponentielle, mode, médiane et moyenne de turbine à gaz examinée..... 68
Figure III.6: Traçage des données de fiabilité de turbine examinée sur un papier de probabilité normale et de la droite d'ajustement..... 71
Figure III.7: Réponse de distribution des données de fiabilité de la turbine et de la courbe de la fonction de répartition du modèle de distribution normale..... 72
Figure III.8: Courbe de la densité de distribution normale..... 73
Figure III.9: Courbe du taux de défaillance de distribution normale..... 73
Figure III.10: Traçage de la droite d'ajustement et la courbe correspondante de la distribution normale tronqué..... 77

Figure III.11: Fonction de répartition de distribution normale et de distribution normale tronquée..... 78
Figure III.12: Fiabilité suivant le modèle de distribution normale et de distribution normale tronquée.... 78
Figure III.13: Densité suivant le modèle de distribution normale et de distribution normale tronquée.... 79
Figure III.14: Taux de défaillance suivant le model de distribution normale et de distribution normale tronquée..... 79
Figure III.15: Traçage de fonction de distribution cumulative de la distribution Log-Normale sur papier de traçage de probabilité Log-Normal..... 81
Figure III.16: Fonction répartition Log-Normal des données de fiabilité de turbine examinée..... 83
Figure III.17: Fiabilité de turbine suivant le modèle Log-Normal..... 83
Figure III.18: Densité Log-Normal des données de fiabilité de la turbine..... 84
Figure III.19: Tracé du taux de défaillance Log-Normal des données de fiabilité de turbine..... 85
Figure III.20: Fonction de répartition a- paramètres estimés par la méthode graphique b- paramètres estimés par la méthode des moindres carrés non linéaires..... 87
Figure III.21: Modèle Weibull appliquée à une turbine à gaz examinée..... 88
Figure III.22: Distribution cumulée des données de turbine à gaz examinée..... 88
Figure III.23: Densité des données de turbine à gaz examinée..... 89
Figure III.24: Taux de défaillance des données de turbine à gaz examinée..... 89
Figure III.25: Modèle Weibull à trois paramètres appliquée à une turbine à gaz examinée..... 91
Figure III.26: Densité de données de fiabilité avec Weibull à trois paramètres de turbine..... 92
Figure III.27: Distribution cumulée avec Weibull à trois paramètres de turbine..... 92
Figure III.28: Taux de défaillance avec Weibull à trois paramètres de turbine..... 92
Figure IV.1: Forme de fonction tangente hyperbolique sur $\Re^+$ 97
Figure IV.2: Fonction de densité..... 99
Figure IV.3: Fonction de risque..... 100
Figure IV.4: Traçage de probabilité cumulé..... 103
Figure IV.5: Tracé de la fonction de densité..... 104
Figure IV.6: Tracé de la fonction de risque..... 104
Figure IV. 7.A: Comparaison d'estimation de la fonction de répartition entre la méthode graphique et la méthode des Moindres carrés non linéaires..... 105
Figure IV. 7.B: Comparaison d'estimation de la densité entre la méthode graphique et la méthode des Moindres carrés non linéaires..... 105

Figure IV.7.C: Comparaison d'estimation de taux de défaillance entre la méthode graphique et la méthode des Moindres carrés non linéaires..... 106
Figure IV.8: Graphes comparatifs entre le modèle à base de la fonction tangente hyperbolique et Weibull deux et trois paramètres..... 107
Figure IV.9: Relation entre le paramètre de forme β et la fonction de risque en forme baignoire..... 109
Figure IV.10: Variation du paramètre de forme $\beta(t)$..... 110
Figure IV.11: Tracé de la probabilité..... 113
Figure IV.12: Tracé TTT des temps de défaillance de 50 éléments..... 115
Figure IV.13: Tracé de la fonction de répartition des temps de défaillance de 50 éléments..... 117
Figure IV.14: Tracé de la fonction de risque des temps de défaillance de 50 éléments..... 118
Figure IV.15: Tracé de la fonction de densité des temps de défaillance de 50 éléments..... 118
Figure IV.16: Tracé de probabilité des temps de défaillance de la turbine..... 119
Figure IV.17: Tracé de la fonction de répartition des temps de défaillance de la turbine..... 119
Figure IV.18: Tracé de la densité des temps de défaillance de la turbine..... 120
Figure IV.19: Tracé de la fonction de risque des temps de défaillance de la turbine..... 120

Liste des tableaux

Tableau I.1: Légende de la Figure I.9..... 28

Tableau I.2: Spécifications de la turbine à gaz Titan 130 28

Tableau II.1: Types de variation de fiabilité, maintenabilité et disponibilité..... 38

Tableau II.2: Différents niveaux intermédiaires..... 38

Tableau II.3: Terminologie système, assemblages et éléments..... 40

Tableau III.1: Paramètre du modèle Exponentiel de fiabilité de la turbine à gaz examinée..... 66

Tableau III.2: Résultat d'ajustement du test Kolmogorov Smirnov..... 67

Tableau III.3: Résultats statiques obtenues de turbine à gaz examinée par le modèle exponentiel..... 69

Tableau III.4: Paramètre du modèle Normal de fiabilité de turbine à gaz examinée 71

Tableau III.5: Résultats statistiques obtenues de la turbine examinée par le modèle normal..... 74

Tableau III.6: Résultat de test d'ajustement..... 75

Tableau III.6: Résultats des paramètres estimés..... 82

Tableau III.7: Résultats statistiques obtenues..... 85

Tableau III.8: Tests d'ajustement du modèle Log-Normale..... 86

Tableau III.9: Comparatif entre méthode graphique et numérique..... 87

Tableau III.10: Résultats statistiques obtenues..... 89

Tableau III.11: Résultat de test d'ajustement..... 90

Tableau III.12: Résultat de test d'ajustement..... 93

Tableau IV.1: Paramètre estimés..... 103

Tableau IV.2: RMSE et MSE des trois modèles..... 105

Tableau IV.3: Valeurs des MTBF calculés 108

Tableau IV.4: Temps de défaillance de 50 éléments..... 115

Tableau IV.5: Valeurs estimées des paramètres..... 116

Tableau IV.5: Valeurs estimées des paramètres..... 119

Introduction générale

La complexité croissante des installations industrielles et leurs contraintes d'exploitation sévères ont augmenté. L'exploitation de ces systèmes industriels a mis en valeur ces stratégies de maintenances. Dans cette thèse, nous avons proposé d'évaluer la fiabilité d'une turbine à gaz, par le développement d'outils permettant l'estimation du processus de dégradation dans ces systèmes et l'analyse de leurs disponibilités. Nous avons proposé d'explorer de nouvelles distributions basées principalement sur des fonctions hyperboliques et de Weibull modifiée, en tenant compte de l'estimation des paramètres de la fonction proposée. Cela est fait dans le but d'estimer la fiabilité et planifier la durée de dysfonctionnement d'un système de turbine à gaz examiné.

Dans la réalité industrielle, l'analyse et l'évaluation des approches de fiabilité des turbines à gaz est utilisée pour éviter les défaillances et les endommagements, dans le but d'augmenter leurs disponibilités et leur productivité. En Algérie, ces types de machine sont utilisés dans plusieurs stations de compression de gaz dans l'industrie des hydrocarbures. Ils sont toujours sujets aux dégradations dues à leurs conditions d'exploitation difficiles dans le Sud. Cette dégradation est induite par plusieurs paramètres qui peuvent aboutir à la défaillance de ces machines. L'objectif de notre travail est l'augmentation de l'efficacité d'une installation pétrolière de compression du gaz. Par la prévention des défaillances des turbines à gaz, nous assurons la disponibilité optimale de ces machines. Les modèles d'évaluation de fiabilité établis sont indispensables pour optimiser la prise de décision et la mise en œuvre des politiques de maintenance dans les turbines à gaz.

L'intérêt majeur de la contribution apportée dans ce travail de thèse, réside dans les résultats de validation des modèles proposés par rapport aux autres approches de fiabilité usuelles. Tels que l'approche exponentielle, normale, normale tronquée, log normale et celle de la distribution de Weibull, et d'autres approches qui sont utilisées dans le domaine de fiabilité des systèmes industriels.

En effet, l'analyse de la fiabilité de la turbine à gaz examinée a été réalisée avec l'évaluation de son effet sur les performances dans la disponibilité de la machine tournante examinée.

Cette thèse est composée de quatre chapitres organisés de la façon suivante :

Le **premier chapitre**, vise à rappeler dans un premier temps le fonctionnement des turbines à gaz avec description de leurs composants. En suite, les différents types des turbines à gaz utilisés dans le domaine du transport du gaz, en présentant l'exemple des turbines à gaz à un seule arbre et les turbines à gaz à deux arbres utiliser dans l'industrie pétrolière du transport du gaz. L'objectif de ce travail est l'augmentation de l'efficacité d'une installation pétrolière de compression du gaz par l'analyse de sa fiabilité, le but est l'application des méthodes d'analyse de fiabilité à ce type de système industriel.

Dans le **deuxième chapitre,** un rappel sur les concepts utilisés dans la fiabilité ainsi qu'un rappel sur les outils de fiabilité pour des fins à la maintenance. Nous avons donné un état de l'art sur la théorie de la fiabilité, ces méthodes de calculs, les lois appliquées dans ce domaine. Ensuite, nous avons présenté les principales lois de distributions de taux de défaillance considéré comme le principal paramètre caractérisant la fiabilité et la base de son évaluation. Finalement, nous avons terminé par une présentation des principaux moyens techniques et outils d'analyse et d'évaluation de la fiabilité tout au long du cycle de vie d'un produit.

Dans le **troisième chapitre**, nous avons présenté la modélisation de fiabilité d'un système de turbine à gaz, en utilisant les approches usuelles de fiabilité. Ce chapitre est consacré à la détermination des modèles quantitatifs d'évaluation de fiabilité par plusieurs tests réalisés sur le cas de turbine à gaz examinée, en utilisant les données réelles recueillies à partir du fonctionnent de cette-ci. Les résultats obtenus dans ce chapitre ont justifie le développement d'une nouvelle distribution basée sur les fonctions hyperboliques et d'une distribution de Weibull modifie. En effet, la complexité croissante des systèmes industriels a un impact majeur sur la bonne exploitation de ces installations de turbine à gaz, l'approche fiabiliste développée dans cette partie de travail de thèse a permis de modéliser les effets de défaillances, pour prédire les performances optimale d'exploitation des turbines à gaz examinées.

Le quatrième chapitre, est destiné à présenter la contribution de ce travail de thèse dans un thème industriel important en intégrant des outils mathématiques basés sur la distribution hyperbolique et de distribution de Weibull modifie pour déterminer des modèles de fiabilité robustes concernant les turbines à gaz. Dans cette partie de travail de thèse, nous avons réalisés une évaluation de fiabilité en utilisant les approches proposées, basée sur une étude statistique sur des données réelles, par les calculs des estimations de fiabilité du système de turbine à gaz. A cet effet, nous avons développé un modèle de fiabilité performant basé sur l'approche hyperbolique et de Weibull modifiée, adaptée à un système de turbine à gaz. Ces approches permettent d'assurer une disponibilité fonctionnelle du système examiné et une fonction logistique permettant d'organiser et de réaliser toute une série de précautions pour éviter les défaillances imprévues.

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale ainsi que les perspectives.

CHAPITRE I

SYSTEME DE TURBINE A GAZ INDUSTRIELLE

Ce chapitre, vise à rappeler dans un premier temps le fonctionnement des turbines à gaz avec description de leurs composants. En suite, les différentes types des turbines à gaz utiliser dans le domaine de transport du gaz, en présentant l'exemple des turbines à gaz à un seule arbre et les turbines à gaz à deux arbres utilisées dans l'industrie pétrolière pour le transport du gaz. En effet, ces machines tournantes ont un grand intérêt, elles sont le plus souvent stratégiques. L'objectif de ce travail est l'augmentation de l'efficacité d'une installation pétrolière des turbines à gaz par l'analyse de leurs fiabilités. Cela, est dans le but d'appliquer, par la suite, les méthodes d'analyse de fiabilité sur ce type de système industriel. Pour la prévention contre les défaillances de fonctionnement, on utilise une approche d'évaluation de fiabilité basée sur les différentes distributions usuelles, qui va nous assurer la disponibilité optimale de ces machines.

I. Introduction

Dans plusieurs domaines de l'industrie et du transport du gaz naturel, les machines tournantes ont un grand intérêt, elles sont le plus souvent stratégiques et indispensables. Comparées aux autres moteurs, les turbines à gaz fonctionnent dans des régimes de fonctionnement difficiles et parfois en mode dégradé, pour répondre aux boisons d'utilisateur (marché) [2, 5, 7, 10 et 21]. Ces machines tournantes sont extrêmement exploitées dans les installations pétrolières, pour le transport du gaz (pipeline). L'efficacité de ces machines est assez élevée, en fonction de leur entretien et maintenance, surtout si leur entretien est basé sur l'analyse de leur fiabilité.

Cependant, la complexité de modélisation de leurs fiabilités augmente encore si la durée d'exploitation augmente (phase de vieillesse) d'une turbine à gaz. Pratiquement, les turbines à gaz ont une longue durée de vie et de nombreux changements se produisent au cours de la vie de ces machines. Ces conditions de fonctionnement motives les spécialistes d'analyser et d'étudier la fiabilité de ce type de machines, pour la prévention contre les défaillances de fonctionnement. Dans la littérature industrielles, plusieurs travaux ont été réalisés dans ce domaine; récemment en 2016 Kai Wei et al. [49] ont étudiés les effets directionnels sur la fiabilité des structures des turbines, Hamed Sabouhi et al. [38] ont fait la modélisation de fiabilité et l'analyse de disponibilité d'une turbine à gaz à cycle combiné. En 2015 Komal Daejun Chang et al. [51] ont réalisés une évaluation de système de fiabilité d'une turbine à gaz à base de la logique floue, utilisant des données incertaines d'exploitation de cas étudié.

En 2014 Manjit Verma et Amit Kumar [56] ont proposés une nouvelle approche pour évaluer la fiabilité du système de turbine à gaz, Cheng Wei Fei et al. [28] aussi ils ont proposés une nouvelle méthode de modélisation de fiabilité pour les aubes d'une turbine à gaz basée sur la conception optimale dynamique de déformation de ces aubes, Yeon Seung Lee et al. [111] ont fait l'optimisation de modèles de fiabilité appliquée à une turbine éolienne installée dans l'offshore, Akwasi F. et al. [17] ont fait une amélioration dans la modélisation de fiabilité de ces turbines éoliennes et Yao Hsu et al. [110] ont fait leurs analyses et évaluations de fiabilité. Bien que d'autres travaux ont été faits avant, en utilisant les approches d'évaluation de fiabilité pour assurer la disponibilité de ces machines.

Ce chapitre, vise à donner une description sur les turbines et leur fonctionnement et leurs composants. En suite, nous allons citer les différents types des turbines à gaz utiliser dans le domaine de transport du gaz, en présentant l'exemple des turbines à gaz à un seule arbre et les turbines à gaz à deux arbres utilisées dans l'industrie pétrolière pour le transport du gaz. Ces informations sont nécessaires pour un fiabiliste pour faire l'analyse de la fiabilité.

I.2. Fonctionnement des turbines à gaz

Une turbine à gaz est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne à flux continu dont le rôle est de produire soit de l'énergie mécanique par l'entrainement en rotation d'un arbre lui-même couplé à une machine industrielle ou à une hélice soit de l'énergie cinétique par détente des gaz en sortie de turbine dans une tuyère [3, 6, 11, 21]. Elles sont utilisés dans un large éventail d'applications, y compris la production d'électricité, la cogénération, la transmission de gaz naturel, ainsi que diverses applications de processus. Ces turbines à gaz sont essentiellement composées de trois éléments principaux: le compresseur, la chambre de combustion et turbine de puissance [6, 21, 22 et 64].

I.3. Eléments principaux d'une turbine a gaz

I.3.1. Compresseur

Un compresseur se compose d'une série d'étages d'aubes orientables, comme il est montré sur la Figure I.1, qui augmentent la vitesse de l'air en termes d'énergie cinétique, suivie alternativement par des étages d'aubes fixes, qui convertissent l'énergie cinétique en une pression plus élevée. Le nombre d'étages de compression est lié à la structure de la turbine à gaz et, surtout, au taux de compression à obtenir. Sur le côté d'admission du compresseur, dont le but primaire est de diriger l'air, fourni par le système d'aspiration, vers le premier étage des aubes du rotor [72].

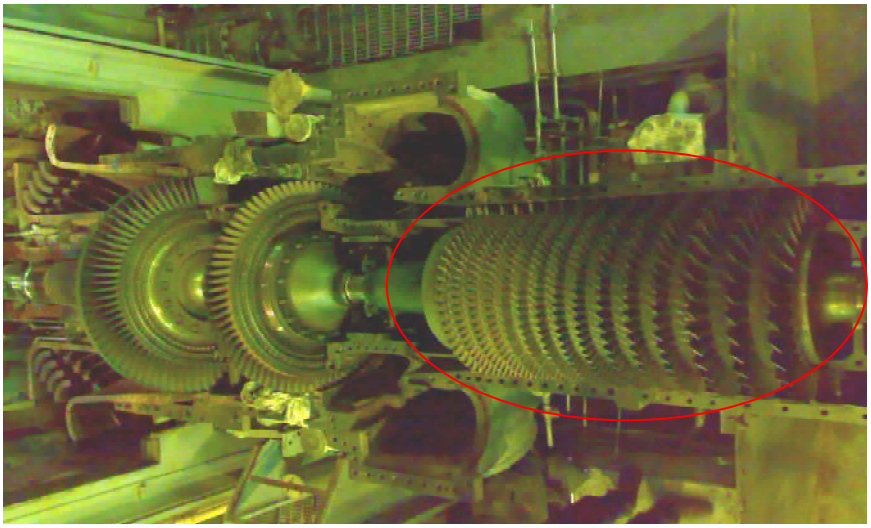


Figure I.1 : Compresseur axial de la turbine à gaz de type GE

I.3.2. Section de combustion

La section de combustion se compose d'un système comprenant une ou plusieurs chambres de combustion, comme il est présenté sur la Figure I.2 et des annulaires disposées symétriquement le long d'une circonférence; ces chambres de combustion reçoivent et brûlent du combustible au moyen d'un nombre égal des brûleurs (un pour chaque chambre de combustion) [7]. L'air entre dans chaque chambre dans une direction opposée à la veine intérieure des gaz chauds (pour cette raison, cette méthode de distribution de l'air s'appelle " distribution à débit inverse"). Ce courant extérieur d'air, qui s'écoule le long des chemises, sert à les refroidir. En outre, l'air qui n'est pas employé dans le processus de combustion, est employé pour refroidir les gaz chauds après la combustion ; en effet, il est introduit dans les chambres par les trous de mélange et refroidit le gaz à la température optimale d'admission de la turbine [4, 9, 62, 63 et 72].

La veine des gaz chauds du système de combustion à l'admission de la turbine traverse les pièces de transition qui transforment les écoulements du gaz de chacune des chambres de combustion en un courant annulaire continu adapté à l'admission de l'anneau de la directrice du premier étage. Au début, le processus de combustion est déclenché par une ou plusieurs bougies d'allumage. Une fois déclenchée, la combustion continue son interventions, aussi longtemps que les conditions d'alimentation de combustible et de l'air de combustion sont maintenues [3, 4, 9, 10, 13, 14, 26, 62, 63 et 72].



Figure I.2 : Chambres de combustion de la turbine à gaz de type GE

I.3.3. Section de la turbine

La section de la turbine comprend un certain nombre d'étages; chacun d'entre eux se compose d'un étage stator et d'un étage rotor (aubes); dans l'étage stator, les gaz à températures et pression élevées, fournis par la pièce de transition, sont accélérés et acheminés vers un étage d'aubes du rotor montées sur un disque connecté à l'arbre de puissance [6]. La conversion de l'énergie thermique et de la pression, en énergie cinétique a lieu dans l'étage du stator. L'étage du rotor complète cette conversion, étant donné qu'ici l'énergie cinétique est transformée en énergie d'entraînement de l'arbre, développant, de cette manière, la puissance requise pour entraîner le compresseur (l'énergie de compression intérieure, ne peut être employée en tant qu'énergie utile extérieure) et pour mettre en marche la machine conduite (générateur, compresseur, etc.) reliée à la turbine à gaz au moyen d'un accouplement, comme il est présenté sur la Figure I.3 suivante [6, 12].

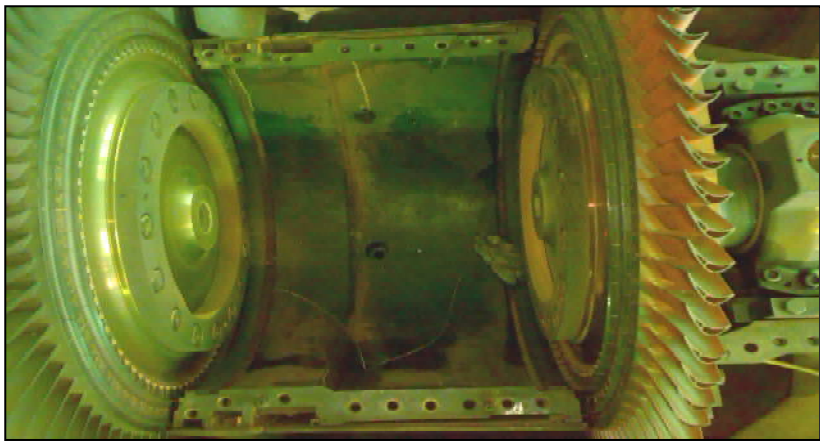


Figure I.3 : Roues pour la transformation d'énergie d'une turbine à gaz de type GE

II.4. Principe de fonctionnement

Une turbine à gaz fonctionne de la façon suivante, d'abord elle aspire de l'air ambiante pour le comprimer à une pression plus élevée, puis en ajoutant à l'aire comprimé un combustible en le brûle dans la chambre de combustion, l'air à pression et à température élevées est acheminé vers la section de la turbine, qui convertit l'énergie thermique en énergie mécanique pour faire tourner l'arbre; ceci sert, d'un côté, à fournir l'énergie utile à la machine conduite, couplée avec la machine au moyen d'un accouplement et, de l'autre côté à fournir l'énergie nécessaire pour la compression de l'air, qui a lieu dans un compresseur relié directement à la section turbine. La Figure I.4 montre les variations de pression et de température dans les différentes sections de la machine correspondant aux phases de fonctionnement des turbines à gaz. Par contre, la Figure I.5, met en évidence que la combustion se produit dans des conditions de pression presque constantes [7, 21, 62, 63].

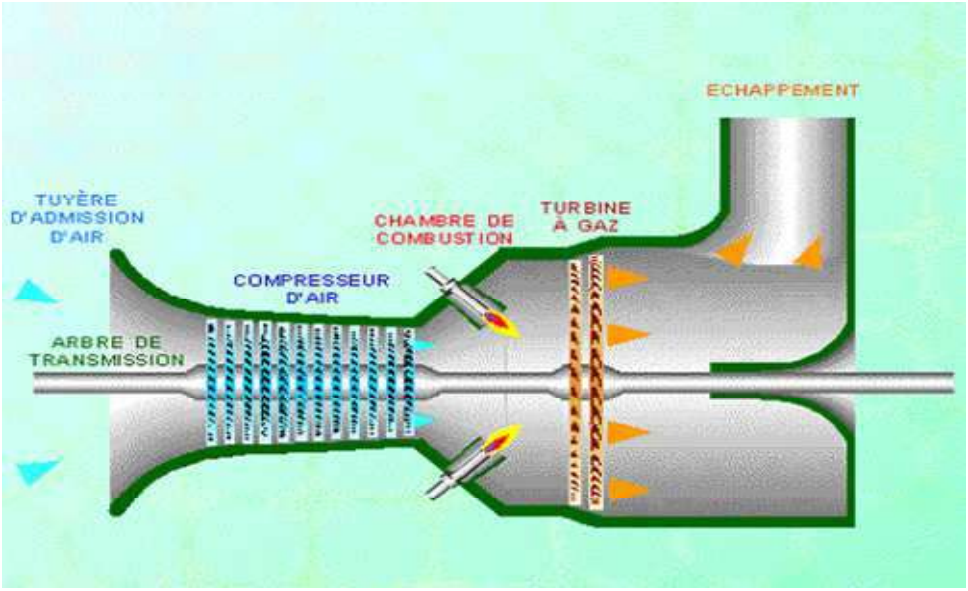


Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'une turbine à gaz

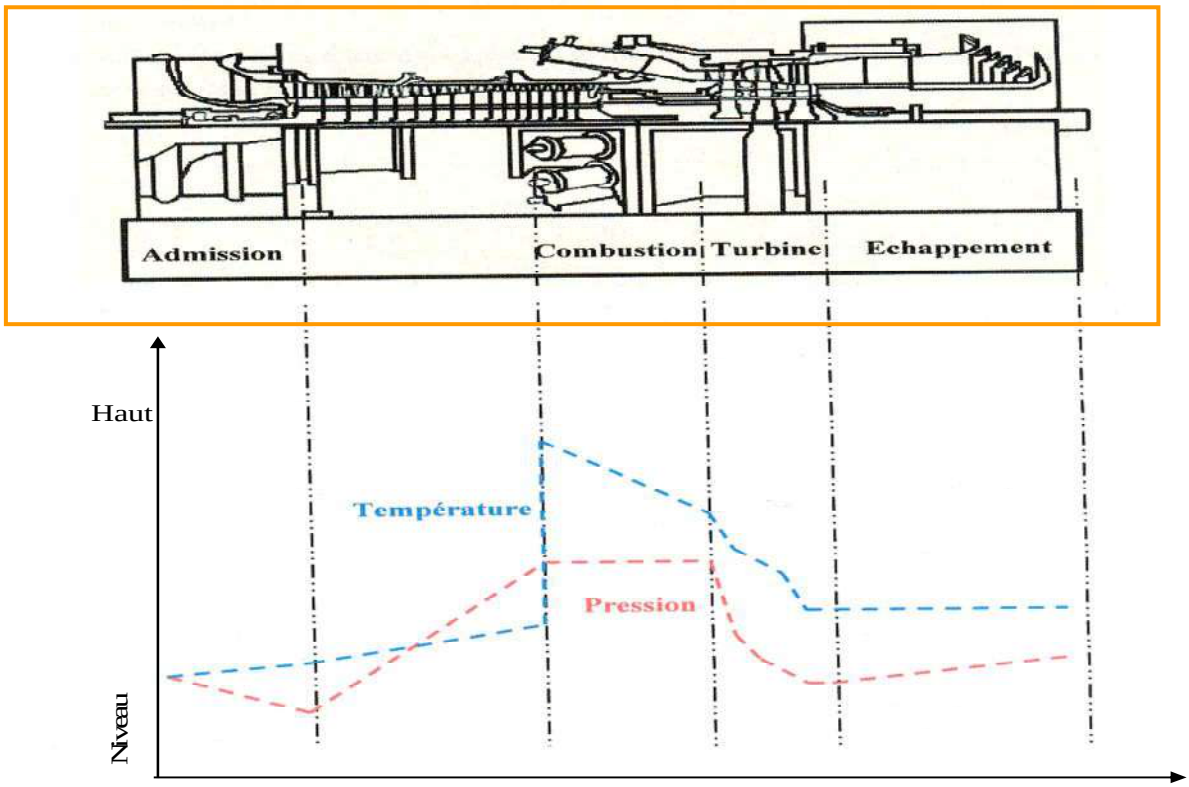
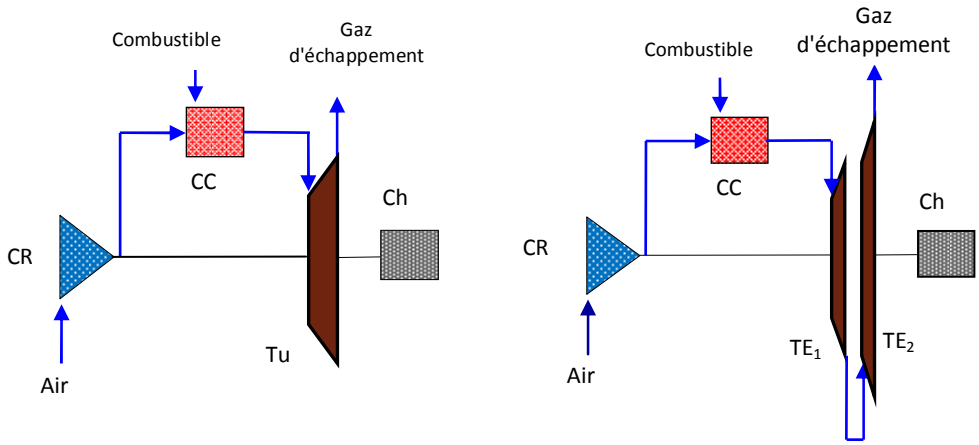


Figure I.5 : Variations de pression et de température dans les différentes sections de la turbine [7]

I.5. Types de turbines à gaz

L'objectif pour le quel on utilise les turbines à gaz est défini par son type qu'on doit choisir, dans l'industrie, on trouve les turbines à un seul arbre, dites aussi mono-arbre, montré sur la Figure I.6, elles sont généralement utilisées dans le cas où on cherche un fonctionnement avec une charge constante (pour entraîner les générateurs d'électricité). Aussi, il y a un deuxième type qui englobe les turbines à deux arbres (bi-arbres), dans le rôle est d'entraîner des appareils à charges variables (pompes, compresseur,…), elles se composent de deux parties, la première assure l'autonomie de la turbine, la deuxième est liée à la charge [7, 61, 62, 68].

On peut citer aussi un autre type de turbine, ce sont les turbines dites dérivées de l'aéronautique, elles ont une conception spéciale suivant le domaine dans le quel elles sont utilisées. Dans ce troisième type, la partie qui assure l'autonomie de la turbine existe toujours et l'énergie encore emmagasinée dans les gaz d'échappement est utilisée pour créer la poussée, en transformant cette énergie (thermique et de pression) en une énergie cinétique de jet dans une tuyère [31, 75].



(CR) Compression d'air, (CC) Chambre de Combustion, (Ch.) Charge, (TU) Turbine, (TE1) Turbine d'entraînement du compresseur et (TE2) Turbine d'entraînement de la charge

Figure I.6: Turbines à gaz à un arbre et à deux arbres

La Figure I.7, représente graphiquement les modifications de capacité de fonctionnement d'une machine pétrolière au cours de son service. Le secteur $1-2$ de la courbe correspond à la période de rodage qui est réalisée, afin de lisser les aspérités des surfaces des pièces mobiles en contact, à effectuer le réglage des éléments, serrage des écrous et à contrôler le fonctionnement. C'est une période de fonctionnement assez courte de durée avec une capacité de fonctionnement délibérément plus faible avec une efficacité réduite et un entretien spécial [21, 22].

Si le rodage est réalisé convenablement, la fiabilité de service et la longévité de la machine seront considérables, la croissance régulière du secteur $2-3$ indique une transition progressive de la machine jusqu'à la capacité de fonctionnement normal (conformément aux caractéristiques de la fiche technique) matérialisée par les laps de temps $3-4, 4-5$.

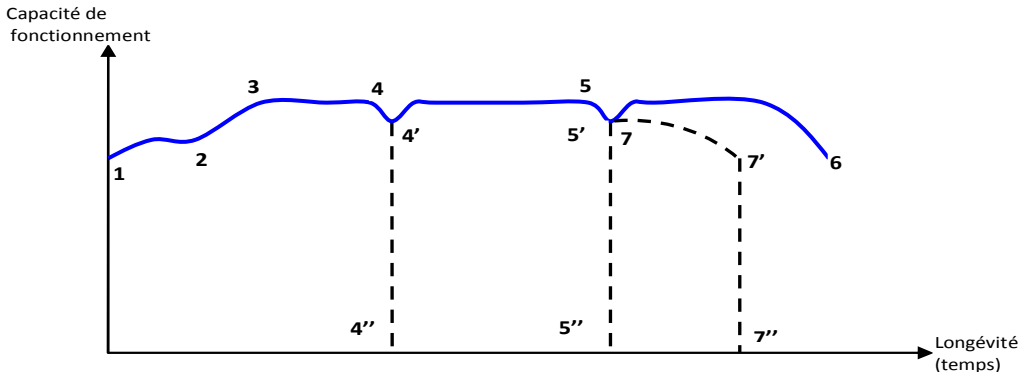


Figure I.7: Variation de capacité de fonctionnement [21-22]

Les secteurs $4.4', 5.5'$ illustrent une réduction temporaire de la capacité de fonctionnement de la machine, par la suite du dérangement de ses assemblages. Pour remédier aux défauts, il faudra que le personnel d'entretien intervienne en temps opiné, si cette intervention n'a pas lieu, il est fort possibilité qu'il se produise une brusque dégradation de la capacité de fonctionnement (secteur $4-4''$ et $5-5''$) ou une réduction progressive de celle –si (secteur $7-7'$).

L'entretien systématique des équipements en service est l'élimination des anomalies qui surgissent, pendant la marche de fonctionnement normal de la machine à un temps prolongé. Cependant, sous l'action de plusieurs facteurs ; tels que (mécaniques, chimiques, électrochimiques…etc. La machine arrive à un moment où le fonctionnement normal ne peut être rétabli, pendant l'exploitation de celle-ci, c'est-à-dire qu'on se trouve dans la nécessité de mettre la machine en réparation (point 6). Le choix correct et opportun de ce moment est d'une importance primordiale pour que la réparation soit rapide, rentable et de bonne qualité.

I.6. Maintenance des turbines à gaz

L'amélioration des équipements consiste à procéder à des modifications, des changements, des transformations sur un matériel correspondant à la maintenance d'amélioration. Dans ce domaine beaucoup de choses restent à faire c'est-à-dire qu'on peut toujours améliorer. C'est un état d'esprit qui nécessite une attitude créative. Cependant pour toute maintenance d'amélioration, une étude économique sérieuse s'impose pour assurer la rentabilité de système industriel [18, 31, 47, 80, 84 et 95].

Actuellement les nouvelles technologies sont appliquées dans plusieurs domaines de l'industrie et en particulier dans l'industrie des hydrocarbures et plus précisément dans la maintenance de machines tournantes (turbines, compresseurs, pompes,…etc.). Afin de réaliser des objectifs bien déterminés. Parmi les techniques des technologies nouvelles appliquées dans les installations des turbines a gaz, on trouve celles qui ont pour but l'extension des cycles coût / intervalles de maintenance basée sur l'analyse de fiabilité [80, 84 et 95].

I.6.1. Interface logicielle des commandes et l'affichage des données

Le logiciel du système de contrôle de la turbine est divisé en deux zones distinctes : Système de contrôle du processus et de l'armature et Moteur principal. Le système de contrôle des systèmes et de l'armature réside dans le contrôleur ControlLogix tandis que le logiciel du moteur principal est intégré au module d'applications spéciales (SAM). Les paragraphes suivants donnent une brève description des modules logiciels.

I.6.1. Module de vibration de la turbine

Ce module surveille les seuils de vibration des paliers par rapport à des seuils d'alarme et d'arrêt d'urgence prédéfinis, assurant ainsi une protection contre les vibrations élevées.

I.6.2. Module de vibration de l'unité entraînée

Ce module surveille les seuils de vibration des paliers de l'unité entraînée par rapport à des seuils d'alarme et l'arrêt d'urgence prédéfinis, assurant ainsi une protection contre les vibrations élevées.

I.6.3. Affichage graphique

Les affichages graphiques ou « vues d'ensemble » sont sélectionnés dans le menu Affichage des tableaux synoptiques de l'équipement. Ces graphiques servent à afficher des informations portant sur différents aspects du système comme suit : Vue générale de la turbine, Circuit du gaz, Système de carburant, Vibration de la turbine GG, Vibration de la turbine TP, Vibration de la pompe Vibration de la boite de vitesse…etc, cela est montré sur la Figure I.8.

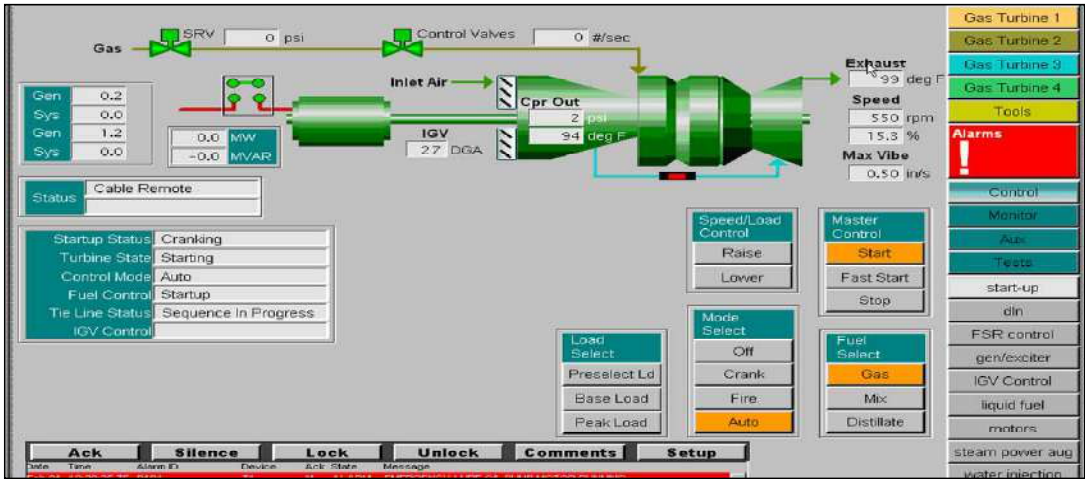


Figure I.8 : Interface de surveillance d'une turbine gaz

I.7. Exemple : turbine Titan 130

La turbine à gaz Titan 130, montré sur la Figure I.9 est une turbine à deux arbres, à écoulement axial qui comprend les ensembles et composants principaux suivants [6]:

- Un ensemble entré d'air,
- Un ensemble compresseur de turbine,
- Un ensemble diffuseur du compresseur/chambre de combustion,
- Un ensemble turbine,
- Un collecteur d'échappement,
- Un arbre d'entraînement de sortie.

Les composants principaux de la turbine restent alignés de façon précise par l'intermédiaire de contre-brides comportant des surfaces pilotes et sont boulonnés ensemble afin de former un ensemble rigide. La turbine développe sa puissance de sortie en transformant l'énergie de la dilatation des gaz en puissance mécanique de rotation. L'énergie de dilatation des gaz entraîne les étages de la turbine qui font tourner la section compresseur de la turbomachine. Les gaz traversent ensuite la turbine libre qui, en reprenant leur énergie, transmet celle-ci à l'arbre de sortie qui entraîne l'équipement concerné. Les spécifications de la turbine à gaz Titan 130 sont données dans le Tableau I.2.

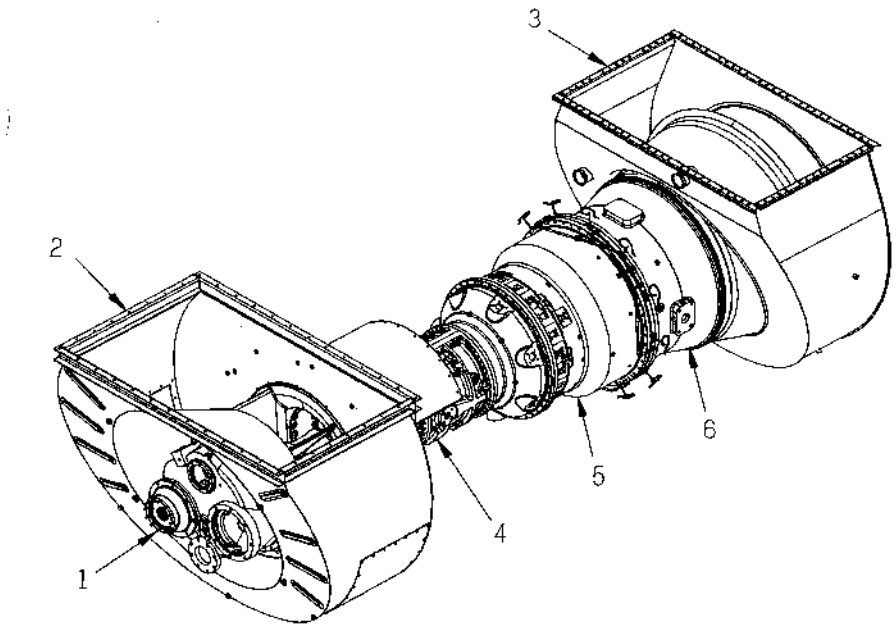


Figure I.9: Turbine à gaz Titan 130 [6]

1	Ensemble prise d'entraînement des accessoires
2	Ensemble entrée d'air
4	Ensemble compresseur de la turbine
3	Collecteur d'échappement
5	Ensemble chambre de combustion 6 Ensemble turbine

Tableau I.1: Légende de la Figure I.9

Description Donnée	
COMPRESSEUR Type Axial	
Nombre d'étages	14
Taux de compression	16:01
Débit	47,4 kg/s (105,2 lb/s)
Vitesse	11 220 tours par minute
CHAMBRE DE COMBUSTION	
Type	Annulaire
Turbine à gaz Titan 130	
Allumage	Torche
Nombre d'injecteurs de carburant	21
TURBINE DU GÉNÉRATEUR DE GAZ	
Type	Réaction
Nombre d'étages	2
Vitesse	11 220 tours par minute
TURBINE LIBRE	
Type	Réaction
Nombre d'étages	2
Vitesse continue maximum	8856 tours par minute
PALIERS	
Lisse	Patin oscillant
De butée	Générateur de gaz : Patin oscillant
	Turbine libre : patin oscillant (à double action)

Tableau I.2: Spécifications de la turbine à gaz Titan 130 [6]

I.8. Domaine d'utilisation des turbines à gaz

Une turbine à gaz, dans laquelle le mélange air gaz sortant de la chambre de combustion à la pression obtenue après compression se détend dans plusieurs étages pour produire de l'énergie mécanique. Cette énergie sert à entraîner le compresseur d'air et à fournir à l'arbre une puissance utilisable, recueillie par exemple par un compresseur. Le mélange air gaz de combustion, appelé gaz d'échappement, sort de la turbine à des températures relativement élevées (450° C à 550° C) et peut donc alimenter un échangeur de chaleur destiné à produire un fluide thermique utilisable tel que la production de la vapeur [7, 9, 36].

En outre, dans chaque cas d'application envisagé, le constructeur de la turbine à gaz ou le fournisseur du groupe devra préciser les performances attendues dans les différentes conditions de fonctionnement prévues. Ainsi, les paramètres propres à chaque turbine peuvent mener à un choix autre que celui indiqué par leur type d'utilisation.

I.8.1. Production d'électricité

Un grand domaine d'emploi des turbines à gaz est la production d'électricité, il s'agit des applications à régime constant et à charge relativement constante pour lesquelles le rendement de ces machines est le meilleur. En effet, la puissance varie de quelques centaines de kW à près de 300 MW [7].

L'arbre de la turbine entraîne un réducteur dont l'arbre à petite vitesse entraîne un alternateur. Le système mécanique est simple et peut être comparé à un groupe turboalternateur à vapeur. Produire uniquement de l'électricité avec une turbine à gaz n'est intéressant que pour des conditions d'exploitation imposant ce système.

I.8.2. Pompage et compression de gaz

L'exemple de type de turbine examinée dans cette thèse est le type de turbines à gaz utilisées dans les stations de pompage et compression du gaz, il est tout à fait possible de remplacer l'alternateur entraîné, par une pompe ou par un compresseur. Le choix entre une turbine à un ou à deux arbres dépend du type de machine accouplée à la turbine et du mode d'exploitation envisagé. Un cycle combiné chaleur-force est encore réalisable.

I.8.3. Autre application

Les applications des turbines à gaz découlent directement de leurs avantages spécifiques. Ainsi, la puissance massique élevée se prête bien à la propulsion aéronautique en particulier sur les hélicoptères. La propulsion navale fait également de plus en plus appel aux turbines à gaz notamment pour les navires à grandes vitesses et à des véhicules militaires [3, 10, 25].

Par contre, la turbine à gaz est mal adaptée aux véhicules routiers, les variations de charge et de régime sont trop importantes et trop rapides pour être réalisables avec un rendement correct. De plus, le rendement atteint difficilement 30% pour des moteurs compacts et de faible puissance alors que les Diesel actuels dépassent 40%. Par contre, elles pourraient trouver un regain d'intérêt pour les chaînes de propulsion hybrides en particulier sur les poids lourds, où l'installation des échangeurs (notamment récupérateur sur échappement) est moins problématique

I.9. Intérêt d'étude de la fiabilité des turbines a gaz

L'exploitation normale d'une turbine à gaz dans un environnement rude tel que le Sahara nécessite une étude de fiabilité et un diagnostic rigoureux, afin d'assurer un bon fonctionnement de l'unité de transport du gaz. Dans ce travail de thèse on s'est intéressé à des données réelle de terrain, recueillis de l'historique d'une installation de turbine à gaz (expérience passive), afin d'évaluer au mieux sa fiabilité, développer dans le troisième chapitre, et sa sûreté de fonctionnement pour proposer un planning des actions de maintenance préventive pour ces types de systèmes [7, 62, 64, 84]. Pratiquement la méthodologie de la recherche de la fiabilité est montrée dans la Figure I.10.

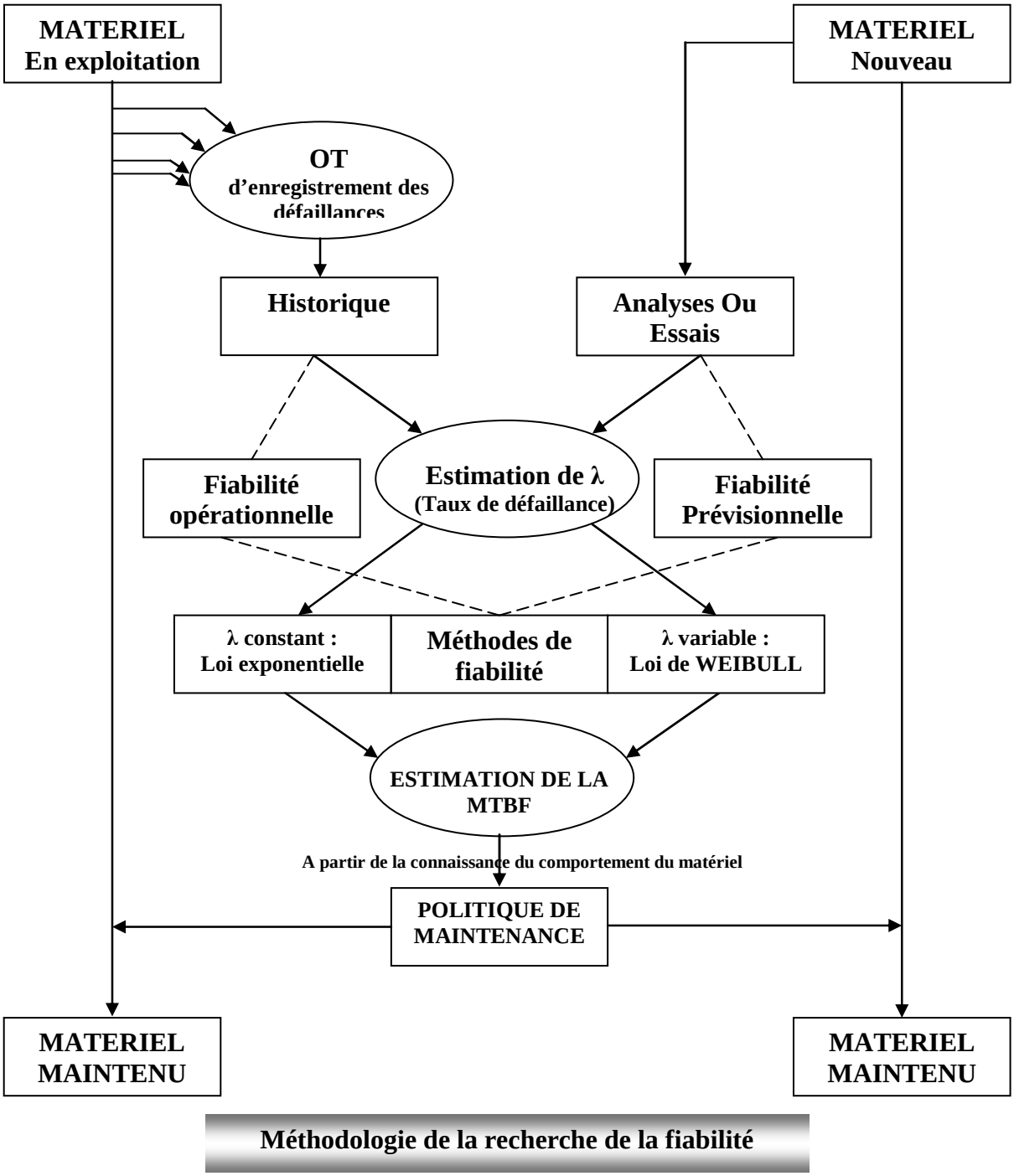


Figure I.10: Méthodologie de la recherche de la fiabilité [64]

I.9.1. Fiabilité opérationnelle et fiabilité prévisionnelle

La fiabilité prévisionnelle (ou technique) caractérise seulement les possibilités techniques de l'équipement en dépendance de sa construction et de sa qualité d'élaboration, ceci à condition que les règlements en matière de technologie d'exploitation et d'entretien soient respectés. Elle caractérise le niveau de conception de la machine [86].

La fiabilité opérationnelle (ou d'exploitation) se détermine par les conditions réelles d'exploitation de l'équipement en tenant compte de tous les facteurs. Elle est obtenue après une suite de défaillances potentielles des composantes de système industriel, la Figure I.11, montre les procédures à suivre dans le cas de fiabilité opérationnelle et de fiabilité prévisionnelle.

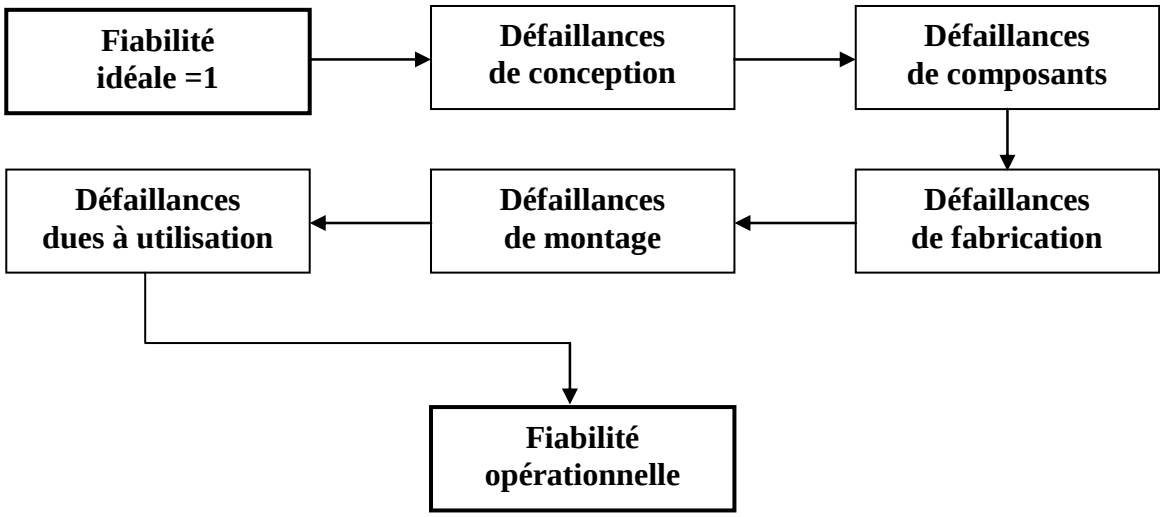


Figure I.11: Procédure de fiabilité opérationnelle et de fiabilité prévisionnelle

L'évaluation de la fiabilité d'un équipement nécessité l'obtention d'informations sur ses composants. Elles sont relatives à des évènements (défaillances) survenus lors du fonctionnement ou de la mise en essais de cet équipement. Très schématiquement, la démarche consiste à observer pendant un certain temps de fonctionnement, dans des conditions réelles d'utilisation, une turbine à gaz auquel on s'intéresse et à répertorier toutes les défaillances qui surgissent et les informations relatives à celle-ci (TBF, TTR). On obtient ainsi les données de base qui permettent de quantifier la fiabilité de la turbine à gaz en question.

Au-delà d'une certaine période de maintenance préventive qui a pour objet de surveiller et d'apprendre à connaître le comportement de la turbine à gaz, le choix du type de préventif se pose. Il est évident que ce choix est à faire au niveau des composants les plus sensibles. Ainsi, la turbine à gaz peut être prise en charge [64, 86] :

- En rondes : lubrification, réglages,….
- En systématique : joints d'étanchéité….
- En conditionnelle : équilibrage, roulements….

L'application d'une méthode de maintenance à la turbine à gaz devrait se faire à partir :

- de sa position dans le process,
- de sa technologie,
- de son comportement statique et dynamique.

I.10. Redondance

Le terme de redondance est un terme général, qui s'emploie lorsqu'un équipement ou un composant peut remplacer automatiquement un autre équipement qui tombe en panne (défaillant). Toute structure autre que la structure série peut être considérée comme redondante, en ce sens que certains composants peuvent être défaillants, sans pour autant que le système cesse d'être utilisable. Par contre, une structure série ne présente aucune redondance [50].

De façon plus particulière, la redondance est une technique d'amélioration de la fiabilité, qui consiste à disposer en parallèle deux ou plusieurs composants ou équipements complets. La fiabilité du système ainsi formé sera plus réconfortante.

I.10.1. Redondance active

Dans le cas de redondance active, tous les composants ou équipements redondants du système fonctionnent en permanence, même lorsqu'ils ne sont pas indispensables [50]. L'utilité globale du système sera la somme des utilités de chacun des équipements.

I.10.2. Redondance passive

La redondance passive consiste à prévoir des composants ou sous-structures « en réserve », non utilisés tant que le besoin ne s'en fait pas sentir (défaillance). L'utilité globale du système sera, alors, égale à l'utilité de chacune des sous-structures redondantes [50].

De part sa nature, la fiabilité fait intervenir les notions de probabilités et de ce fait, donne une prédiction des caractéristiques de performances des systèmes. On peut espérer réduire les risques d'erreurs de ces estimations, mais il ne faut jamais s'attendre à atteindre la certitude absolue. D'ailleurs, l'expérience nous a confirmé cette incertitude à maintes reprises, tel qu'aussi poussé que soit le niveau de préventif mis en œuvre, il subsiste des défaillances résiduelles à caractère aléatoire.

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des descriptions générales sur les turbines à gaz et leurs principaux éléments constructifs. En outre, un tour d'horizon a été présenté autour des études réalisées ces dernières années, traitant le fonctionnement de ces types de machines tournantes. Dans les chapitres suivants, nous entamons quelque applications sur des études de fiabilité d'une turbine à gaz, dans le but d'évaluer sa fiabilité afin d'augmenter l'efficacité d'utilisation en exploitation à l'aide de la diminution du temps de leurs démarrage, et par l'augmentation de la durée de service de cet équipement industriel, en élaborant un planning de maintenance basé sur sa fiabilité. Car, l'analyse de fiabilité doit dans un premier temps permettre de prévenir les défauts afin d'éviter toute dégradation de la turbine mais également prévenir de l'émergence d'un problème et des répercussions sur son fonctionnement, par une planification d'une stratégie de maintenance basée sur son évaluation fiabiliste. Enfin, mais avant tout nous exposons dans le chapitre suivant, les concepts de fiabilité qui seront explorés par la suite sur des exemples de turbines à gaz comportant deux arbres, (un arbre HP, haut pression, et un arbre BP, base pression), dans le but de développer une méthode d'analyse de fiabilité.

CHAPITRE II

CONCEPTS DE FIABILITE INDUSTRIELLE

Dans l'industrie moderne, la fiabilité et la disponibilité fonctionnelle de l'équipement ont une influence essentielle sur la rentabilité et la productivité de ces installations. Dans ce cadre, le but de ce chapitre est de donner les différents concepts et les outils de fiabilité, comme nous donnons un état de l'art sur la théorie de fiabilité et ses différents concepts; nous présenterons les lois mathématiques appliquées dans ce domaine. Ensuite nous présentons les principales relations liées à la détermination de taux de défaillance, qui est considéré comme le principal paramètre caractérisant la fiabilité et les bases de son évaluation.

II.1. Introduction

Aujourd'hui l'industrie moderne est confrontée à un défi important, à savoir comment définir une probabilité de défaillance pour ces équipements installés et exploités sur site. Où cette probabilité de défaillance peut être obtenue à partir des historiques de fonctionnement de ces équipements. Pour cela, des critères de performances en qualité de fiabilité devront être fixés, ces indices de probabilité de défaillance doit être ciblés et bien déterminés, pour la bonne exploitation de ces équipements.

Dans ce but, cette partie de thèse sera consacrée à une synthèse bibliographique sur les méthodes et les outils mathématiques utilisés dans le domaine de fiabilité [58, 60, 65, 66, 67, 77, 85, 88, 89, 93], dédiés pour les processus industriels. En effet, de nombreuses approches ont été développées dans la littérature [98, 99, 102, 104]; Duane F. Alwin dans [32] à validé une technique d'évaluation de fiabilité basée sur des nouvelles approches, Antonovsky A. et al. [18] ont étudié la fiabilité d'un système de production de pétrole avec une perçue de personnel de maintenance de cette installation examinée, Hamed Sabouhi et al. [37] ont fait la modélisation de fiabilité et une analyse de disponibilité sur une centrale de turbine à gaz à cycle combiné, Komal Daejun Chang et Seong-yeob Lee [51] ont introduit le concept de la logique floue à l'analyse de fiabilité appliqué à un système de propulsion à turbine à vapeur, avec l'utilisation d'une approche d'incertitude des données.

D'autre travaux ont été réalisées dans ce sens; Mohamed Arezki Mellal et Enrico Zio dans [61] ont utilisé les approches stochastique pour la l'optimisation de la fiabilité d'un système industriel, Pengfei Wei et al. [81] ont examiné l'analyse des mécanismes de mouvement et de sensibilité de fiabilité en fonction du temps et Wenliang Fan et al. [105] ont fait cette analyse appliquée à un système complexe avec des vecteurs aléatoires corrélés, Xu Zhang et al. [109] ont réalisé une méthode d'évaluation de fiabilité sur la base des plus faibles modes de défaillance pour un système de déchargement d'amarrage d'une turbine à gaz.

Akwasi F. et al. [17] ont fait l'amélioration de la fiabilité d'une turbine de vent avec amortisseurs réglés de colonne de liquide, Manjit Verma et Amit Kumar [56] ont proposé une nouvelle approche pour évaluer la fiabilité du système de turbine à gaz et Mouloud Guemana et al. [68] ont fait l'étude de fiabilité d'une turbine à gaz pour améliorer leur disponibilité en assurant leur exploitation optimale.

Aussi, Need R. et al. [75] ont réalisé une étude d'évaluation de fiabilité d'un système de turbine à gaz avec une étude de cas réelle. A partir d'une synthèse bibliographique effectuer sur ces différentes approches, cela nous a permet d'énumérer les concepts utilises dans la fiabilité industrielle.

II.2. Définition et terminologies

En consultant la littérature existante sur la fiabilité, on se rend compte assez vite de la non unicité de la terminologie dans ce domaine. Nous rappellerons dans ce qui suit les définitions données à certains principaux termes propres au domaine fiabilité industrielle.

II.2.1. Définition de fiabilité

La fiabilité $R(t)$ d'un système est la probabilité qu'il puisse accomplir sa fonction pour laquelle il a été conçu, pendant un temps donné et dans des conditions données [78, 80]. Cette fonction peut être décrite en termes de distribution de probabilité qui peut être utilisée pour modéliser la durée de vie d'un composant d'un système. Aussi, au sens de Rausand et Hoyland (2004) donnée dans [90] **" *L'objectif principal d'une étude de fiabilité devrait toujours fournir les informations pour la prise de décision*".** En effet, les résultats d'une étude de fiabilité d'un système ne nous permet pas directement de dire quoi faire, mais offre les directions et les orientations utiles pour la prise de décision dans plusieurs domaines industriels; tels que l'analyse des risques par l'identification des causes et des conséquences des événements d'échec et de défaillances, et dans la minimisation des opérations de maintenance par l'amélioration de disponibilité de système.

II.2.2. Définition de maintenabilité

La maintenabilité est défini comme la probabilité d'effectuer une action de réparation réussie dans un temps donné. En d'autres termes, la maintenabilité mesure la facilité et la rapidité avec laquelle un système réparable peut être restauré à l'état de fonctionnement après qu'une panne se produise [44]. Par analogie avec la fiabilité, la maintenabilité est la probabilité que l'entité soit réparée entre 0 et t [55].

II.2.3. Définition de disponibilité

Si on considère à la fois la fiabilité (probabilité que l'élément n'est pas défaillant) et la maintenabilité (la probabilité que l'élément soit rétabli avec succès après qu'une panne se

produise), donc une mesure supplémentaire est nécessaire pour la probabilité que le composant/système est opérationnel à un moment donné, est le fait qu' il n'est pas tombé en panne ou il a été restauré après la défaillance, cette mesure est la disponibilité. C'est également la définition adoptée dans cette thèse. Cependant, la disponibilité est un critère de performance pour les systèmes réparables qui représente à la fois les propriétés de fiabilité et de maintenabilité d'un composant ou d'un système [44].

De manière générale, la disponibilité est la capacité d'un système réparable à être dans un état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données à un instant donné ou sur un intervalle de temps donné, en supposant que les ressources extérieures nécessaires sont fournies [46]. Le tableau II.1 suivant regroupe les types de variation entre les différentes mesures de fiabilité, maintenabilité et disponibilité.

Fiabilité	Maintenabilité	Disponibilité
Constante	Décroissante	Décroissante
Constante	Croissante	Croissante
Croissante	Constante	Croissante
Décroissante	Constante	Décroissante

Tableau II.1: Types de variation de fiabilité, maintenabilité et disponibilité

II.2.4. Système, assemblages et éléments

Les produits peuvent varier d'un simple élément (comme les ampoules, les pneus ou les grille-pain) au plus complexe système (comme les ponts, les systèmes de production d'énergie, ou des réseaux de communication). Un produit peut être considéré comme un système constitué de plusieurs parties et peut être décomposée en une hiérarchie de niveaux, le système est placé au niveau le plus haut et les composants au niveau le plus bas. Les différents niveaux intermédiaires sont indiqués sur le tableau II.2 [70].

Niveaux	Caractérisation
1	Système
2	Sous-système
3	Assemblage Important
4	Assemblage
5	Sous-Assemblage
6	Eléments

Tableau II.2: Différents niveaux intermédiaires

Remarque : Les concepts de système et l'élément sont mutuellement dépendants. Chacun contribue à définir l'autre.

Les deux concepts sont liés, car un objet technique peut être considéré comme un système dans une analyse, mais un élément dans une autre. Outre la division d'un système en éléments peut dépendre de la précision de l'analyse, la connaissance du système, la compréhension de l'objectif et des mesures de performance. La division d'un système peut également dépendre du but de l'analyse.

Par exemple, une analyse de maintenance peut exiger une division en ensembles de construction, tandis que l'analyse de la performance peut nécessiter une division dans les structures fonctionnelles [82].

II.2.4.1. Composants

Toute partie d'un système qui est indivisible pour les besoins de l'étape actuelle de l'analyse de la fiabilité [82].

II.2.4.2. Modules

La décomposition arborescente d'un équipement fait atteindre le niveau «sous-système », « Assemblage » ou « module » qui est stratégique pour la maintenance. La Figure II.8 montre que c'est à partir du niveau d'un module que se pose la question : Nous consommons ou nous réparons ?

Un module ou un assemblage est un sous-ensemble conçu pour être rapidement « déposé » aux fins d'interchangeabilité. Un moteur électrique, une pompe centrifuge, un vérin, une carte électronique, un automate programmable sont des modules.

Leur dépose permet des interventions correctives ou préventives rapides et aisées minimisant les arrêts de production. C'est un aspect important de la « maintenabilité » à imposer à la conception modulaire d'un équipement. Après dépose, deux options sont possibles, suivant les compétences présentes et suivant les coûts du module et de son éventuelle remise à niveau [47]:

- A consommation du module par échange standard et élimination de l'ancien,
- La remise à niveau du module, après test, démontage puis expertise, suivie d'une remise en stock « rechanges ».

Une autre terminologie peut être utilisée, et cela suivant le but et la précision de l'analyse donné dans [53, 73 et 107], comme il est montré sur le Tableau II.3.

Niveaux	Caractérisation
1	Macro-Système
2	Système
3	Sous-système
4	Module
5	Composant
6	unité
7	Elément

Tableau II.3: Terminologie système, assemblages et éléments

II.2.4.3. Sous systèmes

Une partie d'un système qui peut être divisé en parties plus petites. En règle générale, un sous-système assure sa propre sous fonction [82].

II.2.5. Systèmes

Un système est une structure d'unités qui fonctionnent comme un ensemble. La désignation d'une collection d'unités ou un autre élément comme un système peut dépendre de la phase de conception, de production, de test ou d'utilisation [82].

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 et les interactions entre ces derniers. Aussi 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) et ses interactions avec son environnement [106].

II.2.5.1. Systèmes non réparables

Un système non réparable est un système qui est mis au rebut dès qu'il tombe en panne. C'est le cas des petits systèmes (par exemple des ampoules) ou des systèmes qui coûtent plus cher à réparer qu' a remplacer [79].

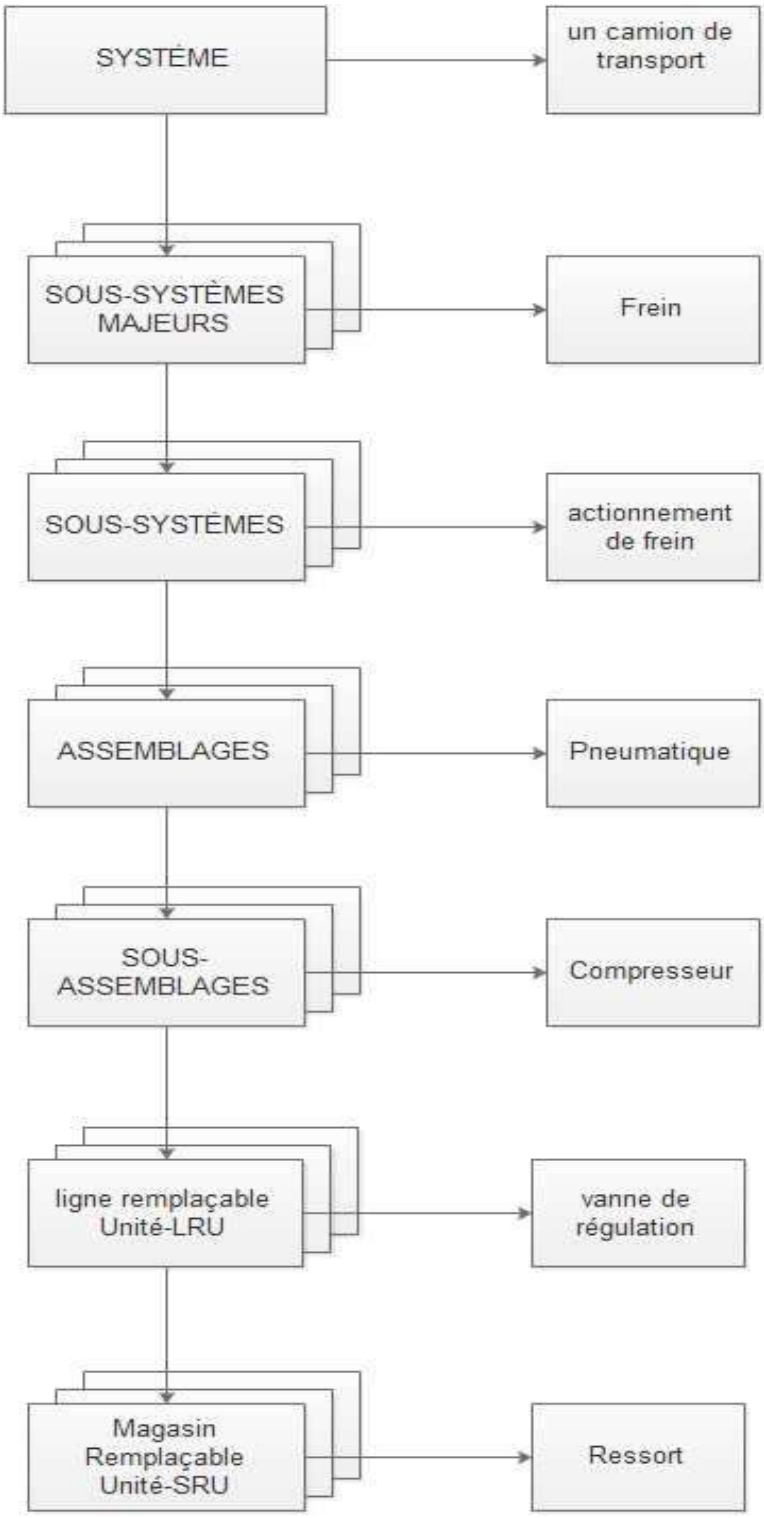


Figure II.1: Configuration de la hiérarchie de la conception [107]

II.2.5.2. Systèmes réparables

Un système réparable est un système qui, après sa défaillance, peut être remis en état de marche par des actions de réparation ou maintenance. C'est le cas de tous les systèmes

complexes et en particulier des systèmes informatiques. Pour ces derniers, au lieu de réparation, on parle plutôt de correction, débogage ou mise à jour [79].

II.2.6. Défaillances

La défaillance est définie comme la « cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ». Cette cessation peut être complète (l'entité ne remplit plus sa fonction) ou partielle (la fonction est assurée dans certaines limites, on parle alors de modes dégradés). Les défaillances peuvent être momentanées (indisponibilité du composant à remplir sa fonction pendant un temps donné, le composant redevient disponible sans réparation) ou permanentes en (la défaillance du composant est irréversible, une maintenance est nécessaire pour remettre le composant en service) [55].

La définition de l'ingénierie de la fiabilité précise que la probabilité de défaillance est appliquée seulement sur un élément. Ceci est important parce que l'élément seul peut tomber en panne. Un système ne tombe pas en panne lui même, pas plus que tous les niveaux de conception subordonnés dans la configuration de la conception du système; seul l'élément tombe en panne. L'ingénierie de la fiabilité étudie les effets d'une panne d'un élément sur la fonctionnalité du niveau supérieur suivant dans l'hiérarchie de la configuration et sur la fonctionnalité de la configuration du niveau suivant jusqu'à la fonctionnalité du système [107].

Une défaillance en anglais (Failure), c'est la cessation de la capacité d'un élément pour exécuter une fonction requise. Dans ce sens, il faut noter que; après une défaillance l'élément présente un défaut et que la défaillance est un événement par opposition à un «défaut» qui est un état. Ce concept tel qu'il est défini ne vise pas les éléments constitués seulement de logiciel [46].

Une définition du dictionnaire de la défaillance est de "défaillir dans quelque chose de prévu, tenté ou souhaité, ou d'une certaine façon insuffisants, voire inexistants ''. D'un point de vue technique, il est utile de définir la défaillance dans un sens plus large [27]. Witherell (1994) élabore comme suit: '' la défaillance peut être tout incident ou toute condition qui rend une installation industrielle, produit fabriqué, processus, matériel, ou d'un service dégradé ou devenir inadapté ou incapable de remplir sa fonction ou sa finalité en toute sécurité, de manière fiable, et rentable '' en conséquence, '' la définition de l'échec devrait inclure les

opérations, le comportement ou les applications des produits qui conduisent à l'insatisfaction, ou des effets secondaires indésirables, inattendus ''.

Plus de définitions formelles de l'échec sont les suivantes:

- ✓ '' la défaillance est la cessation de la capacité d'une entité à accomplir une fonction requise [45] '' [Commission électrotechnique internationale, CEI 50 (191)].
- ✓ '' Équipement fait défaut, si il n'est plus en mesure de mener à bien sa fonction prévue dans les conditions opérationnelles particulières pour lesquelles il a été conçu '' (Nieuwhof, 1984) [76].
- ✓ «défaillance» est un événement lorsque les machines / équipements ne sont pas disponibles pour produire des pièces à des conditions spécifiées au moment prévu ou ne sont pas capables de produire des pièces ou effectuer des opérations prévues au cahier des charges. Pour chaque défaillance, une action est nécessaire (Society of Automotive Engineers, 'Reliability and Maintainability Guideline for Manufacturing Machinery and Equipment' [70 et 95].

II.2.7. Défaut

Un défaut est l'état du produit caractérisé par son incapacité à remplir sa fonction requise. Un défaut est donc un état résultant d'une défaillance [70].

II.2.7.1. Modes de défaillance

Les défaillances d'un même composant peuvent avoir des conséquences différentes. Par exemple, pour un disjoncteur, la défaillance au niveau de l'électronique qui gère l'ouverture du dispositif peut avoir comme conséquence l'ouverture du disjoncteur alors qu'une panne au niveau d'un capteur va entraîner la non-ouverture du disjoncteur lorsqu'il est sollicité à l'ouverture. Il est ainsi important de distinguer, pour un composant, les défaillances qui ont des conséquences différentes et qui, donc, entraînent des comportements différents du système. Ces diverses défaillances sont appelées modes de défaillance du composant [55].

Définition:

L'effet par lequel un défaut est observé sur l'élément défectueux est le mode défaillance [46]. Un mode de défaillance est une description d'un défaut. Il est parfois appelé mode de défaut [par exemple, la norme CEI 50 (191)]. Les modes de défaillance sont identifiés par l'étude de la fonction (performance) d'un produit. Blache et Srivastava (1994) dans [25] suggèrent un système de classification des modes de défaillance. Une brève description des différents modes de défaillance est donnée dans la section suivante.

A. Défaillances intermittentes

Une défaillance intermittente est la défaillance qui ne dure que pendant une courte période. Un bon exemple en est les défauts des logiciels qui se produisent par intermittence.

B. Défaillances étendues

Une défaillance étendue c'est les défaillances qui continuent jusqu'à ce qu'une action corrective rectifie l'échec. Ils peuvent être divisés en deux catégories:

1. Défaillance complète: Il en résulte une perte totale de la fonction,
2. Défaillance partielle: Il en résulte une perte partielle de la fonction.

Chacun d'elle peut être subdivisé en ce qui suit:

1. Les défaillances soudaines: Des défaillances qui se produisent sans aucun avertissement.
2. Les défaillances progressives: Des défaillances qui se produisent avec des signaux pour avertir de l'apparition d'une défaillance.

Une défaillance complète et soudaine est appelé une défaillance catastrophique, et une défaillance progressive et partielle est désigné comme une défaillance dégradé.

II.3. Mesures pour les systèmes non réparables

II.3.1. Fiabilité des systèmes non réparables

Pour les mesures de fiabilité $R(t)$ pour les systèmes non réparables, la fonction de fiabilité est définie comme la probabilité qu'une entité fonctionne entre 0 et t [55, 70].

$$\forall x \geq 0, R(X) = P(X > x) \quad \text{(II.1)}$$

Du fait qu'une entité ne peut fonctionner éternellement, on peut considérer que $R(t)$ (R pour reliability en anglais) est une fonction non croissante variant de 0 à 1 sur $[0,+\infty]$ avec la $\lim R(x) = 0$ pour $x \to \infty$.

II.3.2. Disponibilité des systèmes non réparables

La disponibilité $A(x)$ d'une entité est la probabilité qu'elle fonctionne à l'instant x, dans le cas d'un composant non réparable, la disponibilité et la fiabilité se confondent à $A(x) = R(x)$ et dans le cas contraire $A(x) \succ R(x)$.

II.3.3. Temps moyen de bon fonctionnement

Le temps moyen de bon fonctionnement MTTF (Mean Time To Failure) ou le temps moyen de bon fonctionnement avant la première défaillance MTFF (Mean Time To First Failure). Supposons que la fonction de la fiabilité d'un système est donnée par $R(x)$, le MTTR peut être calculé comme suite:

$$MTTF = \int_0^{\infty} x.f(x)dx = \int_0^{\infty} R(x)dx \qquad \text{(II.2)}$$

II.3.4. Taux de défaillance

Le taux de défaillance $h(x)$ d'un système non réparable est un taux horaire (homogène à l'inverse d'un temps) représentant la probabilité conditionnelle que le composant tombe en panne entre x et $x + \Delta x$, sachant qu'il a fonctionné de 0 à x, donné par la formule suivante:

$$\forall x \geq 0, h(x) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{1}{\Delta x} \mathrm{P}\left(x < X \leq x + \Delta x \middle| X + x\right) \qquad \text{(II.3)}$$

Il est facile d'établir les liens entre le taux de défaillance et la fiabilité, donnée par:

$$h(x) = \frac{f(x)}{R(x)} = \frac{f(x)}{1 - F'(x)} = \frac{R'(x)}{R(x)} = -\frac{d}{dx} \ln R(x) \qquad \text{(II.4)}$$

En intégrant et en prenant comme condition initiale $R(0) = 1$, car on a supposé que le système fonctionne l'instant initial, on obtient la formule d'exponentiation suivante :

$$R(x) = \exp\left(-\int_0^x h(u)du \right) \qquad \text{(II.5)}$$

La Figue II.2 montre un exemple typique de la forme de la courbe du taux de défaillance en fonction du temps.

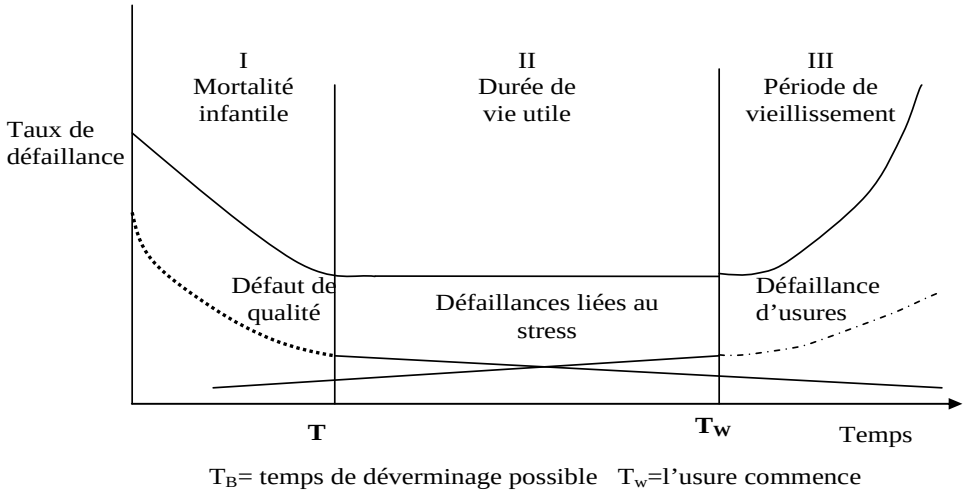


Figure II.2: Taux de défaillance

La durée de vie d'un système peut être divisée en trois périodes distinctes, comme il est montré sur la Figure II2, qui représente la courbe en forme de baignoire, qui modélise le taux de défaillance à chaque phase de vie de système, en fonction du **temps [68].** Sur cette Figure on peut distinguer trois zones différentes vue l'allure de la courbe :

II.3.3.1. Zone I: Période de mortalité infantile

La première période est aussi appelée période de mortalité infantile et elle est caractérisée par une diminution de taux de défaillance. En effet, la période de mortalité infantile (DFR), caractérisé par un taux de défaillance élevé au début. Ceci est normalement le résultat des problèmes de conception, l'utilisation de composants de qualité inférieure, ou de l'absence de contrôles adéquats dans le processus de fabrication.

II.3.3.2. Zone II: Période normale

La deuxième période est appelée la période normale de vie d'un système, cette période suit la partie plate de la courbe de baignoire. La durée de vie utile, se caractérise par un taux de défaillance essentiellement constant (CFR). Ceci est la période dominée par des pannes fortuites. Les défaillances de risque sont les défaillances qui résultent de causes strictement aléatoires. Ils ne peuvent pas être éliminés par des périodes de déverminage longues ou même pas par de bonnes pratiques d'entretien préventif. L'équipement est conçu pour fonctionner sous certaines conditions et à certains niveaux de stress.

Lorsque ces niveaux de stress sont dépassés en raison d'événements imprévus ou inconnus au hasard, une défaillance au hasard se produira.

II.3.3.3. Zone III: Période de vieillissement

La troisième période est appelée période de vieillissement, commence au point où la pente commence à augmenter et se prolonge jusqu'à la fin du graphe. La période de vieillissement, qui se caractérise par une (IFR) à la suite de la dégradation des équipements en raison de l'âge ou de l'utilisation. Par exemple, les composants mécaniques comme les roulements de transmission finiront par s'user et ne parviennent pas, quelle que soit la façon dont ils sont fabriqués. Les défaillances précoces peuvent être reportées et la vie utile de l'équipement est prolongée par de bonnes pratiques de conception et de maintenance [30, 33, 39, 50, 57, 60].

La seule façon de prévenir des défaillances qui résultent du vieillissement est de remplacer ou de réparer les composants détériorés avant qu'ils tombent en panne.

II.3.5. Taux de défaillance cumulé

Le taux de défaillance cumulé d'un système non réparable est la fonction du temps H est définie par [79]:

$$\forall x \geq 0, H(x) = \int_0^x h(u)du = -\ln R(x) \quad \text{(II.6)}$$

Donc, la formule d'exponentiation s´écrit comme suite:

$$R(x) = \exp(-H(x)) \quad \text{(II.7)}$$

II.4. Mesures pour les systèmes réparables

Quand les systèmes sont réparables, deux cas de figure sont possibles, selon que l'on prend en compte ou pas les durées de réparation [79].

II.4.1. Durées de réparation comptabilisées

Le fonctionnement du système est une succession de durées de bon fonctionnement X_i et de durées de non fonctionnement ou de réparation Y_i, comme il est montré sur la Figure II.3.

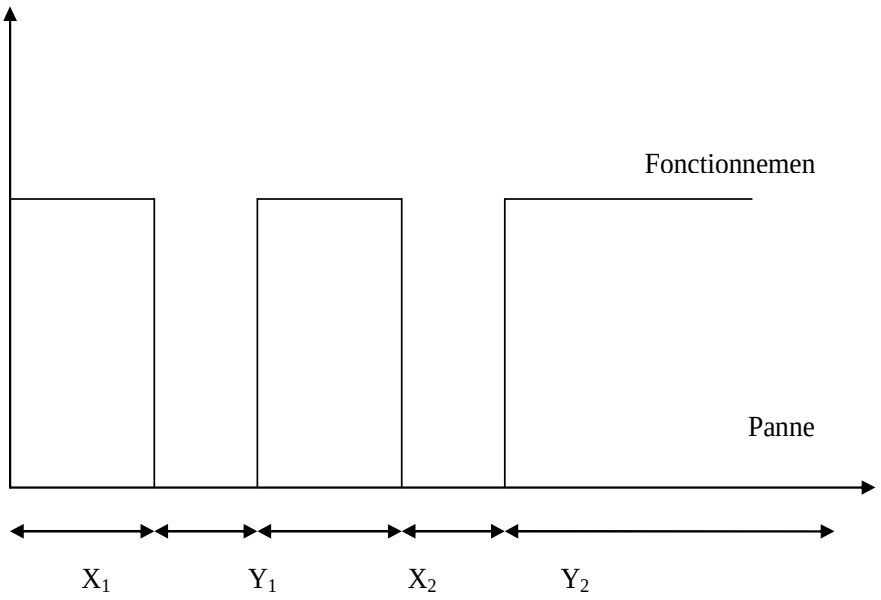


Figure II.3: Durées de bon fonctionnement et de réparation

II.4.2. Maintenabilité

La maintenabilité est la fonction de répartition de Y exprimé en y est la probabilité qu'un système en panne à l'instant 0 soit réparé avant l'instant y, donnée par la formule suivante:

$$\forall y \geq 0, M(y) = P(Y \leq y) \tag{II.8}$$

II.4.3. Taux de réparation

Est introduit de façon similaire au taux de défaillance, qui sera représenté par la formule suivante:

$$\forall y \geq 0, \mu(y) = \lim_{\Delta y \to 0} \frac{1}{\Delta y} P(y < Y \leq y + \Delta y | Y > y) \tag{II.9}$$

II.4.4. Temps moyen de réparation

Le temps moyen de réparation MTTR (Mean Time To Repair) est la durée moyenne de réparation donnée par:

$$MTTR = \mathbf{E}[Y] = \int_0^{+\infty} [1 - M(y)] dy \tag{II.10}$$

II.4.5. Fiabilité des systèmes réparables

La fiabilité à l'instant x est la probabilité que le système ne tombe pas en panne entre 0 et x, donnée par la formule suivante:

$$\forall x \geq 0, R(x) = \cdot (X_1 > x) \tag{II.11}$$

II.4.6. Durée moyenne entre deux défaillances

La durée moyenne entre deux défaillances successives MTBF (Mean Time Between Failures), **[58]**, comprenant la durée moyenne de bon fonctionnement et la durée moyenne de réparation, est donnée par:

$$MTBF = MTTF + MTTR \tag{II.12}$$

II.4.7. Disponibilité des systèmes réparables

La disponibilité d'un système réparable est la fonction du temps A (Availability en anglais) telle que :

$$\forall t \geq 0, A(x) = P(x) \tag{II.13}$$

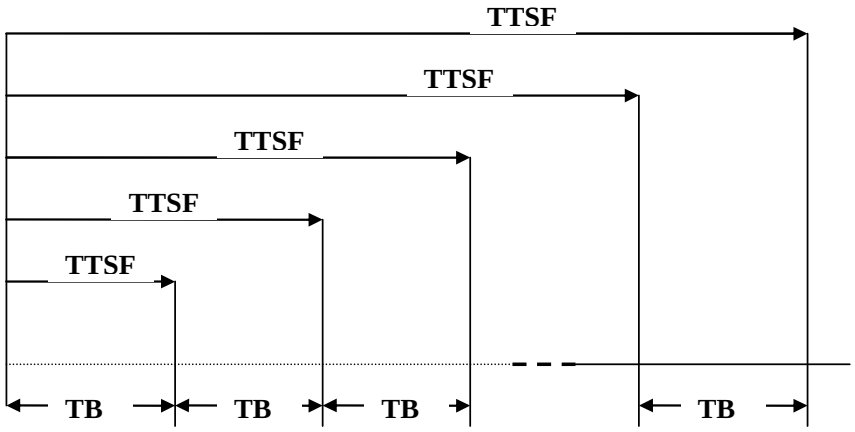
Avec : $P(x)$ est la probabilité que le système fonctionne à l'instant x.

On a alors souvent la disponibilité:

$$\lim_{t \to +\infty} A(x) = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \tag{II.14}$$

II.4.8. Durées de réparation non comptabilisées

En pratique, il est fréquent que les durées de réparation soient négligeables par rapport aux durées de bon fonctionnement. Ce processus de défaillance du système est représenté sur la Figure II.4. Un processus ponctuel est caractérisé par des observations sous la forme d'événements ponctuels qui se produisent dans le temps. Ces processus se produisent dans de nombreux domaines d'études tels que l'économie, la physique et la fiabilité du système.



TTF_i= temps de défaillance
TBF_i=intervalle de temps entre deus défaillance

Figure II.4: Processus de défaillance d'un système réparable

Un processus ponctuels peut être défini en spécifiant :

- Description de chaque événement et la mesure du temps (par exemple, les heures de fonctionnement, rondes, cycles, ...etc,
- Les intervalles observés entre les événements successifs notés TBF_1, TBF_2, ... TBF_N ou les instants d'occurrence des événements mesurés à partir du moment origine notée $TTSF_1$, $TTSF_2$, ... $TTSF_N$,
- Dans le cas ou les instants d'observations sont périodique, le nombre des événements dans chaque période devient la grandeur essentielle à mesurée.

Le processus de défaillances d'un tel système réparable est défini de manière équivalente par l'un des trois processus aléatoires suivants.

1. Suite des instants de défaillance

Les intervalles à la survenance d'événements mesurés à partir de l'origine des temps ($TTSF_1$, $TTSF_2$, ... $TTSF_N$) sont appelés les temps d'arrivée ou instants de défaillance [94].

2. Suite des durées inter défaillances

Les intervalles observés entre les événements successifs (TBF_1, TBF_2, ... TBF_N) sont appelés temps inter arrivées ou durées inter défaillances [43, 94]. Ces durées inter défaillances prouvent être calculer en utilisant les relations suivantes:

$$\begin{aligned} TBF_{n+1} &= TTSF_{n+1} + TTSF_n \quad Si \quad TTSF_n \prec +\infty \\ TBF_{n+1} &= +\infty \quad Si \quad TTSF_n = +\infty \end{aligned} \tag{II.15}$$

II.5. Processus de comptage des défaillances

Parmi les processus stochastiques discrets, les processus de comptage des défaillances dans l'ingénierie de fiabilité sont largement utilisés pour décrire l'apparition des événements dans le temps, par exemple, les défaillances, le nombre de réparations parfaites, etc. Le processus de comptage le plus simple est le processus de Poisson. Le processus de Poisson joue un rôle particulier dans de nombreuses applications dans la fiabilité. Le processus de comptage le plus connu sous le nom du processus de renouvellement. Ce processus est décrit comme une séquence d'événements, d'intervalles entre séquences sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées.

Dans la théorie de la fiabilité, ce type de modèle mathématique est utilisé pour décrire le nombre d'occurrences d'un événement dans l'intervalle de temps. Un processus stochastique, entière non négatif, $N(t)$ est appelé un processus de comptage, si $N(t)$ représente le nombre total d'occurrences des événements dans l'intervalle de temps $[0,t]$ et il satisfait ces deux propriétés de type SI / Alors, [43, 83], données par:

$$\begin{aligned} &Si \;\; t_1 \prec t_2 \;\; \text{Alors} \;\; N(t_1) \le N(t_2) \\ &Si \;\; t_1 \prec t_2 \;\; \text{Alors} \;\; N(t_2) - N(t_1) = Nbr_{Occurances} \end{aligned} \tag{II.16}$$

Avec $Nbr_{Occurances}$ est le nombres des occurrences des événements dans l'intervalle $[t_1, t_2]$.

II.5.1. Fiabilité avec un processus de comptage des défaillances

La fiabilité d'un système réparable avec un processus de comptage des défaillances à l'instant t est la fonction R_t définie par :

$$\forall \tau \ge 0, \quad R_t(\tau; n, t_1, t_2, ..., t_n) = \mathrm{P}\left(T_{n+1} > t + \tau \middle| N_t = n, T_1 = t_1, ..., T_n = t_n\right) \tag{II.17}$$

Autrement dit, $R_t(\tau; n, t_1, t_2, ..., t_n)$ est la probabilité que le système fonctionne sans défaillances pendant une durée au moins égale à τ après t , sachant qu'il y a eu exactement n défaillances entre 0 et t aux instants $t_1, t_2 \ldots, t_n$.

II.5.2. Intensité de défaillance

L'intensité de défaillance d'un système réparable à l'instant t est la fonction λ_t définie par :

$$\lambda_t(n;t_1,...,t_n) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{1}{\Delta t} P\left(t < T_{n+1} \le t + \Delta t \middle| N_t = n, T_1 = t_1,...,T_n = t_n\right) \quad \text{(II.18)}$$

La probabilité dans cette écriture est la probabilité que le système tombe en panne entre t et $t + \Delta t$ sachant tout le passé du processus des défaillances à l'instant t.

L'intensité de défaillance est aux systèmes réparables ce que le taux de défaillance est aux systèmes non réparables.

Quelque fois la notation $\nu(t)$ est utilisée au lieu de $\lambda(t)$. Il doit être noté que la notation $\lambda(t)$ peut être trompeuse, elle ne doit pas être confondue avec la fonction taux de risque (défaillance), pour lesquels la même notation est utilisée. À ce stade, il est important de préciser la différence entre la fonction du taux de risque et la fonction de l'intensité. La fonction du taux de risque est une caractéristique de la distribution des durées de bon fonctionnement avant la défaillance (ou durées entre deux défaillances successives), tandis que le ROCOF est une caractéristique du processus ponctuel.

II.5.3. Fonction moyenne

La fonction moyenne (en anglais mean value function) du processus des défaillances est la fonction m définie par :

$$\forall t \ge 0,\ m(t) = E[N_t] \quad \text{(II.19)}$$

II.6. Fiabilité des systèmes série complexes

D'une manière générale, les systèmes réels sont constitués de plusieurs composants et présentent plusieurs modes de défaillance; de tels systèmes sont dits complexes. Une modélisation fonctionnelle sous forme de schéma bloc de ces systèmes permet d'en déterminer la fiabilité. Chaque bloc représente un composant ou un mode de défaillance. Par ailleurs, les blocs sont considérés indépendants les uns des autres. Les associations fonctionnelles de blocs les plus couramment rencontrées sont les associations série, parallèle, série / parallèle, les redondances actives m parmi n et les redondances passives.

II.6.1. Fiabilité d'un système série

Un système série, comme il est montré sur la Figure II.5, fonctionne si et seulement si tous les composants fonctionnent, la fiabilité est calculée par la relation suivante :

$$\begin{aligned} R(T) &= \Pr(\mathrm{T} > \mathrm{t}) \\ &= \Pr\left[(T_1 > t) \cap (T_2 > t) \cap \ldots\ldots\ldots\right] \\ \longrightarrow &= \prod_i \Pr(\mathrm{T_i} > \mathrm{t}) = R_i(t) \end{aligned} \tag{II.20}$$

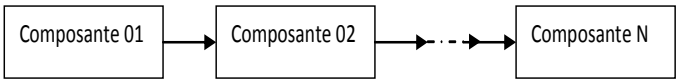


Figure II.5: Système en série

II.6.2. Fiabilité d'un système parallèle

Un système parallèle, comme il est montré sur la Figure II.6, fonctionne si au moins un de ses composants fonctionne. La fiabilité pour ce système est donnée par [50]:

$$\begin{aligned} R(t) &= 1 - F(t) \\ R(t) &= 1 - \Pr\left[(T_1 \le t) \cap (T_2 \le t) \cap \ldots\ldots\ldots\right] \\ &= 1 - \prod_i \Pr(T_i \le t) = 1 - \prod_i \left(1 - R_i(t)\right) \end{aligned} \tag{II.21}$$

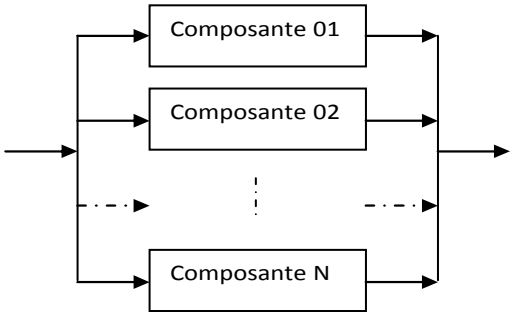


Figure II.6: Système en parallèle

II.6.3. Fiabilité d'un système hybride

Un système hybride, comme il est montré sur la Figure II.7, peut être représenté selon de type de redondance; Un système en redondance active m parmi n fonctionne si au moins m parmi les n composants redondants fonctionnent. Si les composants sont indépendants et identiquement distribués ($R = R_j,\ j = 1, 2, \ldots, n$), alors la fiabilité du système est donnée par [50]:

$$R(t) = \sum_{j=m}^{n} \binom{n}{j} R^{j} (1-R)^{n-j} = \binom{n}{j} = \frac{n!}{j!(n-j)} \quad \text{(II.22)}$$

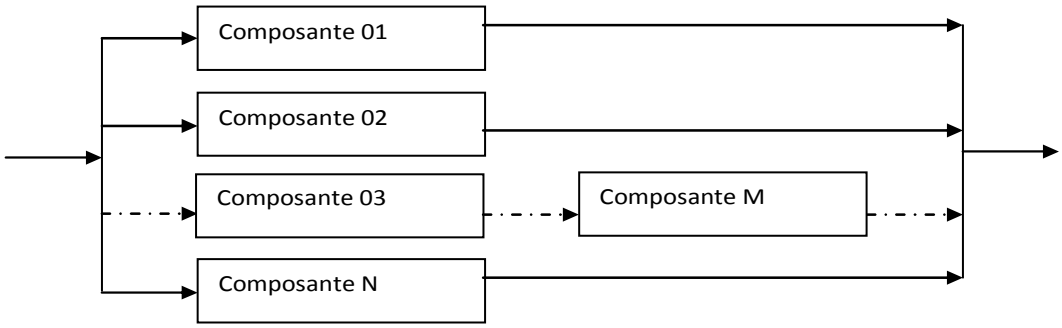


Figure II.7: Système hybride

II.6.4. Redondance passive

Dans une redondance passive les composants redondants ne sont mis en service que lorsque les composants du système sont défaillants. Si les composants ont la même loi de fiabilité $R(t)$, la fiabilité de ce système est donnée par [50]:

$$R_{sys}(t) = R(t) + \int_{0}^{t} f(\tau) R(t-\tau) d\tau \quad \text{(II.23)}$$

II.7. Modèles de fiabilité usuels

Pratiquement, la fiabilité est une grandeur quantitative et nécessite la connaissance des distributions de durée de vie afin de l'estimer. Ces distributions doivent absolument tenir compte de tous les mécanismes de défaillance associés aux différentes technologies [68]. Nous présentons dans cette section les lois et les modèles de fiabilité susceptibles, selon l'expérience, de représenter des distributions de durée de vie qui interviennent le plus fréquemment dans l'analyse de la fiabilité. Nous rappelons les principales propriétés de ces lois, les fonctions de fiabilité associées, les densités de probabilité ainsi que les taux de défaillance.

II.7.1. Loi exponentielle

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines, elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales. La loi exponentielle est la plus couramment utilisée en fiabilité électronique pour décrire la période durant laquelle le taux

de défaillance des équipements est considéré comme constant (défaillance aléatoire) [95]. Elle décrit le temps écoulé jusqu'à une défaillance, ou l'intervalle de temps entre deux défaillances. Elle est dénie par un seul paramètre qui est le taux de défaillance λ, elle est caractérisée par :

- **la fiabilité :** $R(t) = e^{\lambda t}$
- **la densité de probabilité :** $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$
- **le taux de défaillance :** $\lambda(t) = \lambda$

Remarque: Il existe d'autre variété des lois exponentielle définie par deux paramètres

II.7.2. La loi de Weibull

La loi de Weibull est souvent utilisée en plusieurs application industrielles; elle caractérise bien le comportement du produit dans les trois phases de vie, présenter indépendamment, selon la valeur du paramètre de forme β, pour la période de jeunesse $\beta \prec 1$, période de vie utile $\beta = 1$ et pour la période d'usure ou vieillissement $\beta \succ 1$. La loi de Weibull est définie par deux paramètres η et β, elle est caractérisée par :

- **la fiabilité :** $R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}$
- **la densité de probabilité :** $f(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}$
- **le taux de défaillance :** $\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$

II.7.3. La loi normale

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

- **la fonction de répartition :** $F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^2} dx$

- **la densité de probabilité :** $F(t)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{(t-\mu)}{\sigma}\right)^2}$

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

$$\phi(u)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{u}e^{-\frac{1}{2}x^2}dx \qquad \text{(II.24)}$$

II.7.4. Loi log normale

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

- **la fiabilité :** $R(t)=1-\Phi\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right)$
- **la densité de probabilité :** $f(t)=\frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{(\log(t)-\varpi)}{\sigma}\right)^2}$
- **le taux de défaillance :** $\lambda(t)=\frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{(\log(t)-\mu)}{\sigma}\right)^2}}{t\int_0^{\infty}\sigma\sqrt{2\pi}\,f(t)dt}$

II.7.5. Loi Gamma

Elle représente la loi de probabilité d'occurrence de a événements dans un processus de poisson. Par exemple si t_i est le temps entre les défaillances successives d'un système, et que t_i suive une distribution exponentielle, le temps cumulé d'apparition de a défaillances suit une loi Gamma :

- **la densité de probabilité :** $f(t)=\frac{t^{a-1}e^{-\frac{t}{b}}}{b^a\Gamma(a)}$

- **le taux de défaillance :** $\lambda(t) = \dfrac{t^{a-1}e^{-\frac{t}{b}}}{b^a \int_t^{\infty} \Gamma(a) f(u)du}$

II.7.6. Loi Bêta

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

- **la densité de probabilité :** $f(t) = \dfrac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a).\Gamma(b)} t^{a-1}(1-t)^{b-1}$

II.7.7. Loi uniforme

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

- **la fonction de répartition :** $F(t) = \dfrac{t_a}{b-a}$

- **la densité de probabilité :** $f(t) = \dfrac{1}{b-a}$

II.7.8. Autres lois

Cependant, il existe d'autres lois de probabilité comme : la loi binomiale, la loi de Poisson, la loi hypergéométrique,...etc.

II.8. Analyses de fiabilité qualitatives

Les démarches qualitatives de fiabilité ont pour objectif la recherche de toutes les causes pouvant affecter la fiabilité du système de tous les effets engendrés par l'une de ses défaillances potentielles. Nous en distinguons plusieurs types au sein desquels s'organisent différentes méthodes d'analyse. On s'intéresse de plus près aux effets et aux conséquences qu'une défaillance donnée que peut avoir le système lui-même et sur son environnement.

Donc, il s'agit de rechercher les causes d'un événement ou d'une défaillance ainsi que le rôle de la fiabilité consiste d'abord à choisir les méthodes les plus adaptées au type de problème abordé, aux objectifs qui lui sont fixés et aux moyens dont on dispose. Ensuite, il doit faire

en sorte que l'exploitation de ces méthodes aboutisse à la réalisation d'un modèle de fiabilité du système et des défaillances qui l'affectent.

II.9. Méthodes d'estimation des paramètres des lois de fiabilité

Dans la fiabilité prévisionnelle, l'estimation des paramètres des lois de fiabilité est nécessaire pour réagir le plus tôt possible sur la conception du système. L'estimation des paramètres des lois de fiabilité expérimentale et opérationnelle s'appuie sur deux types de données de fiabilité : les données des essais de fiabilité (pour la fiabilité expérimentale) et les données du retour d'expérience (pour la fiabilité opérationnelle) [38, 54 et 62].

Les méthodes d'estimation des lois de fiabilité à partir de ces données sont soit des méthodes de régression soit des méthodes de maximum de vraisemblance. Dans le premier cas, le principe consiste à linéariser la loi de fiabilité paramétrique que l'on souhaite ajuster et d'identifier les paramètres par simple régression linéaire. Dans le second cas, l'idée est d'estimer les paramètres de la loi de fiabilité qui maximisent la vraisemblance de retrouver les temps de défaillances observés.

II.10. Méthode de régression et la méthode du maximum de vraisemblance

Les paramètres de fiabilité peuvent être estimés par plusieurs méthodes. On peut citer, entre autres, la méthode du maximum de vraisemblance et la méthode de régression.

II.10.1. Méthode de régression linéaire

La méthode de régression consiste à linéariser le modèle de fiabilité et à calculer ses paramètres à partir de la droite de régression qui s'ajuste au mieux aux points estimés (x_i, y_i). Par exemple, la linéarisation de la loi exponentielle est obtenue en prenant le logarithme de la fonction de distribution :

$$\begin{aligned} R(t) &= 1 - F(t) = \exp(-\lambda t) \\ R(t) &= \ln[1 - f(t)] = -\lambda t \end{aligned} \qquad \text{(II.25)}$$

Si on pose $y = \ln[1 - F(t)]$ et $x = t$, donné par l'expression (II.25) devient $y = -\lambda x$, le paramètre λ est donné par la pente de la droite de régression qui s'ajuste au mieux aux points $(t_i, F(t_i))$, ou la fonction $F(t)$ peut être estimée par la méthode des rangs moyens ou des rangs médians.

La forme linéaire des distributions appartenant à la famille des distributions log fonction d'un paramètre de localisation et d'un paramètre d'échelle qui est donnée par :

$$\Phi^{-1}(t) = \frac{\ln(t)}{\sigma} = -\frac{\mu}{\sigma} \tag{II.26}$$

Si on pose $y = \Phi^{-1}(t)$, $x = \ln(t)$, $\sigma = \frac{1}{a}$ et $\mu = -b\sigma$ la relation (II.25) devient $y = ax + b$, soit l'équation d'une droite.

II.10.2. Méthode du maximum de vraisemblance

La fonction de vraisemblance est égale ou proportionnelle à la probabilité d'observation des événements (défaillances). Pour un échantillon et un modèle donné, la fonction de vraisemblance peut être vue comme une fonction de paramètres inconnus p, les paramètres du modèle.

II.11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un état de l'art sur les différents concepts utilisés dans le domaine de fiabilité des systèmes industriels. Cela, permet de voir globalement, et rappeler dans un premier temps la terminologie utilisée dans la littérature scientifique relative aux différentes techniques utilisées pour les fonctions et les distributions de fiabilité. En deuxième lieu les bases nécessaires à la compréhension de la théorie de fiabilité ainsi que le vocabulaire utilisé par les communautés de fiabilistes et des maintenancier, qui étudient et développent le domaine qui est très vaste. Le plus important à retenir est que la fiabilité d'un système industriel se construit, s'analyse et s'évalue tout au long du cycle de la vie d'un système. Aussi, on a présenté les principales lois de distributions et des taux de défaillance qui sont considérées comme la base d'évaluation de la fiabilité. Finalement, un résumé des méthodes et des outils d'analyse et d'évaluation de la fiabilité a été établi où nous allons présenter par la suite au troisième chapitre, l'application de la plus part entre eux sur un système de turbine à gaz.

CHAPITRE III

FIABILITE D'UNE TURBINE A GAZ AVEC LES APPROCHES USUELLES

Ce chapitre est consacré à la modélisation de fiabilité d'un système de turbine à gaz, en utilisant les approches usuelles de fiabilité. En utilisant les données réelles recueillies à partir de fonctionnent de cette turbine à gaz. Les résultats obtenus dans ce chapitre, ont donné une justification de plus à proposer un développement de nouveaux modèles basées sur les fonctions tangente hyperboliques et Weibull modifie, où ils seront présentés par la suite dans le dernier chapitre de cette thèse. En effet, la complexité croissante des systèmes industriels a un impact majeur sur la bonne exploitation de ces installations de turbine à gaz, l'approche de la fiabilité développée dans ce travail de thèse à permet de modéliser les effets de défaillances, pour prédire les performances optimale d'exploitation de turbine à gaz examinée.

III.1. Introduction

Récemment, la fiabilité est devenue un paramètre clé en qualité d'aide à la décision, car la fiabilité couvre des nombreux aspects; tels que les systèmes d'analyse de défaillance. En effet, l'analyse de la fiabilité est essentielle pour l'étude de la sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Dans ce chapitre, nous allons présenter la modélisation de la fiabilité d'un système de turbine à gaz, en utilisant les modèles usuels de fiabilité. Cette partie de travail propose des solutions à la modélisation de la fiabilité des turbines à gaz industrielle, pour augmenter la durée de vie de ces équipements et pour aider à élaborer des plans d'entretien le plus approprié et assigner une probabilité à un bonne exploitation de système examiné. Cela est pour répondre aux besoins du marché et de la concurrence économique, des installations utilisent ces types de machines, et qui devient de plus en plus sévères. Car, les exploitants ont des tendances, de plus en plus, à moderniser leurs installations et de les rendre plus complexe, ce qui contribue en même temps à rendre plus difficile à les contrôler et en particulier pour réduire la sécurité et augmenter le risque de pannes.

Cependant, en statistique, une distribution est la répartition des données observées en donnant leurs fréquences, dans le domaine de la fiabilité les données observées, représentent en général, l'événement des défaillances au cours de la durée vie d'un système. En d'autres termes, la fonction de distribution de probabilité décrit la plage de valeurs possibles qu'une variable aléatoire (événement de défaillance) peut atteindre et la probabilité que la valeur de cette variable aléatoire soit dans un sous-ensemble mesurable de cette plage de valeurs.

La fonction de distribution de probabilité peut être discrète ou continue en fonction de la nature des données qui sont considérés. Si la variable aléatoire étudiée est une variable continue, sa fonction de distribution de probabilité est une fonction distribution de probabilité continue.

On considérant le processus de défaillances qui est définie comme étant processus aléatoire, les données de ce processus suivent une distribution de probabilité, par conséquent suivent mathématiquement une fonction de distribution de probabilité, pas forcement connue. Pratiquement, divers lois de distribution de probabilité sont utilisées pour modeler les données de fiabilité. Dans ce chapitre nous allons exposer les diverses lois de distributions

de probabilité utilisée pour modéliser les données de fiabilité en présentant des applications de ces lois sur les données de fiabilité des turbines à gaz.

III.2. Loi Exponentielle

La distribution exponentielle est une loi simple comptant uniquement un paramètre $(\lambda > 0)$; qui et couramment utilisée pour modéliser les données de fiabilité. Très utilisée mais peu réaliste à cause de son taux de panne constant. Sa fonction densité de probabilité est donnée par la formule suivante:

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t} & ,t \geq 0, \\ 0 & ,t < 0. \end{cases} \quad \text{(III.1)}$$

Et la distribution a pour support l'intervalle $[0,+\infty[$ et la fonction de répartition est donnée par :

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda t} & ,t \geq 0, \\ 0 & ,t < 0. \end{cases} \quad \text{(III.2)}$$

Par conséquence, la fiabilité est donnée par:

$$R(t) = \begin{cases} e^{-\lambda t} & ,t \geq 0, \\ 1 & ,t < 0. \end{cases} \quad \text{(III.3)}$$

La durée moyenne entre deux défaillances MTBF ou MTTF, suivant la nature du système réparable ou non, est égale à m , donnée par:

$$m = \frac{1}{\lambda} \quad \text{(III.4)}$$

Avec λ est le taux de défaillance constant, défaillances par unité de période de mesure, par exemple, les défaillances par heure, par million d'heures, par million de cycles, par million de miles, par million d'activations, ...etc. Et t est le temps d'exploitation, de vie, ou l'âge, en heures, cycles, miles, actionnements, tours, ...etc.

Certaines caractéristiques spécifiques à la distribution exponentielle à un paramètre sont les suivantes:

1. Le paramètre de position est nul, ce qui signifie que le risque production des défaillances commence à l'âge zéro,

2. Le paramètre d'échelle est de $\frac{1}{\lambda}$. Quand λ diminuée, la distribution est tendue vers la droite, et quand λ augmente, la distribution est poussée vers l'origine.

Cette répartition n'a pas de paramètre de forme car elle n'a qu'une seule forme, c'est à dire la forme exponentielle et le seul paramètre qu'il a est le taux défaillance λ.

On dit aussi que la distribution exponentielle est sans mémoire, ce qu'on exprime de la façon suivante : Le temps de survie d'un composant à un instant t ne dépend pas du temps déjà passé dans l'état de marche. Ceci signifie qu'à l'instant t, le composant est considéré comme neuf (ou "as good as new" en anglais). Mathématiquement nous avons :

$$P(T \geq t) = P(T \geq T + s | T \geq s), \text{ pour } t > 0, s > 0 \quad \text{(III.5)}$$

III.2.1. Graphe normalise de Nelson-Aalen

Le temps total en test (TTT) ou le graphe normalise de Nelson-Aalen est mathématiquement la transformée TTT normalisée est définie par [23]:

$$\varphi(u) = \int_0^{F^{-1}(u)} R(t)dt \quad \text{pour } 0 \leq u \leq 1 \quad \text{(III.6)}$$

Une utilisation importante de la TTT transformation est le développement graphe TTT, le graphe TTT fournit une technique graphique utile pour l'identification du modèle.

Le graphe TTT (TTT Temps total en Test), est un tracé empirique et à échelle indépendante basé sur les données de défaillance, et la courbe asymptotique correspondante TTT transformée normalisée, ont été introduites par Barlow et Campo en 1975 et utilisé à des fins d'identification de modèle de Barlow et al. En 1975 dans [23]. Depuis lors, ces outils se sont avérés très utiles dans de nombreuses applications pratiques et théoriques, de la fiabilité [20, 23 ,71]. Pour les données de fiabilité d'une turbine à gaz examinée, le graphe TTT est représenté dans Figure III.1.

Sur cette Figure III.1, on constate clairement que ces données ne peuvent être représentées par le modèle Exponentiel, car le tracé présente une tendance vers une croissance du taux d'occurrence des défaillances (une Concavité de la courbe tracée par les données et elle ne suit pas la diagonale) [52, 54, 84]. Delà, on peut dire que ces données de fiabilité sont loin d'être modélisées par une loi exponentielle.

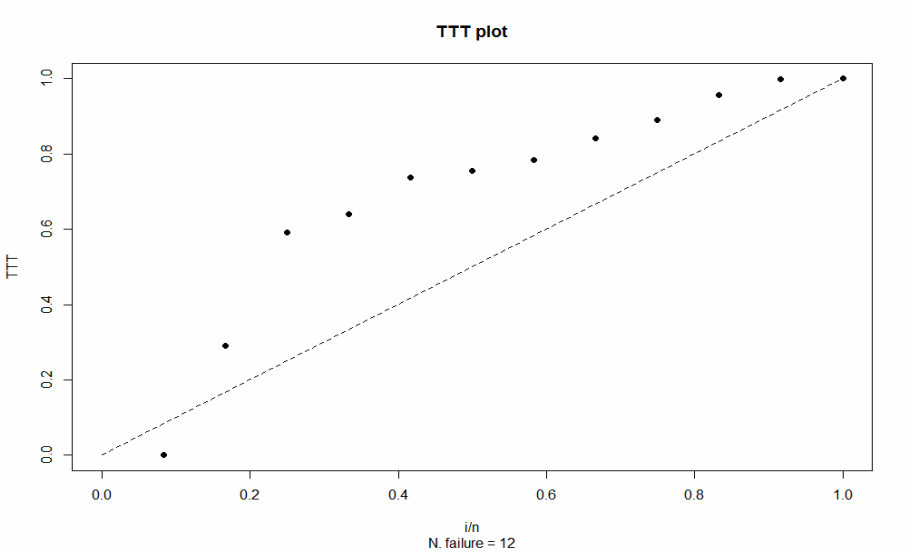


Figure III.1: Graphe TTT des données de fiabilité d'une turbine à gaz examinée

III.2.2. Détermination des paramètres

Etant donné que la distribution exponentielle est à un paramètre λ, le taux de défaillance (Paramètre d'intensité), alors il y a deux possibilités de faire l'estimation de ce dernier. L'utilisation de la méthode graphique et les méthodes basées sur les statistiques d'ordre. Les méthodes basées sur les statistiques d'ordre, utilisées dans l'estimation des paramètres, sont plus générales et applicables à tous les types de modèles et tous les types de données.

Le tracé de probabilité de Weibull et la méthode graphique la plus utilisée pour la détermination des paramètres et est le moyen visuel le plus simple pour résumer les données de fiabilité en traçant les estimations de la CDF (Fonction de distribution cumulative ou Fonction de répartition) en fonction du temps en utilisant une échelle log-log et de faire un ajustement linéaire des points tracés.

Cela doit être réalisé après un changement de variables judicieux permettant de ramener l'ajustement à une simple régression linéaire, dans ce cas:

$$\begin{aligned} &F(t_i) = 1 - e^{-\lambda t_i} \\ &1 - F(t_i) = e^{-\lambda t_i} \\ &\ln(1 - F(t_i)) = -\lambda t_i \\ &\ln(-\ln(1 - F(t_i))) = \ln(\lambda) + \ln(t_i) \\ &Y_i = A + X_i \end{aligned} \qquad \text{(III.7)}$$

Avec $Y_i = \ln(-\ln(1 - F(t_i)))$, $A = \ln(\lambda)$ et $X_i = \ln(t_i)$

Sur la Figure II.2, les données de fiabilité de la turbine sont représentées par les points (X_i, Y_i) un ajustement par une droite est appliqué sur ces points. Cette droite a pour équation :

$$Y = \hat{A} + X \quad \text{Où } \hat{A} \text{ est la valeur estimée de } A \tag{III.8}$$

Avec $\hat{A}$ est déduite directement du tracé, car elle représente l'abscisse du point d'ordonnée 63 %. Delà, on peut calculer la valeur estimée du paramètre d'intensité λ, par la formule suivante:

$$\hat{\lambda}_{WPP} = \exp(\hat{A}) \tag{III.9}$$

La valeur de $\hat{\lambda}_{WPP}$ peut être lue directement sur le papier WPP (Weibull Probability Paper) sans passer par la valeur de $\hat{A}$. Cette méthode introduit des erreurs de lecture sur le graphe WPP, ainsi que des erreurs dues a la transformation logarithmique des coordonnées des points.

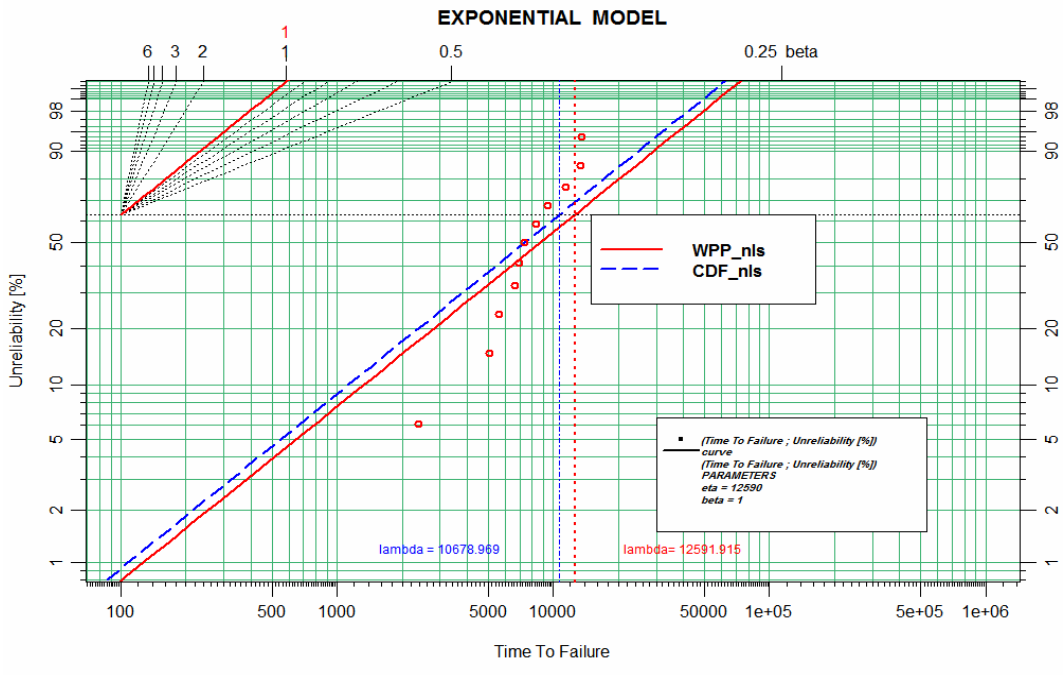


Figure III.2: Tracé de probabilité de Weibull de la turbine à gaz examinée

Une autre droite est représenté sur la même Figure II.2, qui est tracé on utilisant une estimation de λ à l'aide des méthodes basées sur les statistiques d'ordre $\hat{\lambda}$, Méthode des moindres carrés pour un modèle non-linéaire (nonlinear least-squares estimates). Les résultats sont résumés dans le tableau Tableau III.1, suivant:

Paramètres	$\hat{\beta}_{WPP} = 1/\hat{\lambda}_{WPP}$	$\hat{\beta} = 1/\hat{\lambda}$
Valeurs	12591.91	10678.97

Tableau III.1: Paramètre du modèle Exponentiel de fiabilité de la turbine à gaz examinée

III.2.3. Fonction de répartition

En observant la Figure III.3 on remarque que l'écart entre la fonction de répartition du modèle théorique et des données expérimentales (Observées) est très important. Suite à cet ajustement, différents tests statistiques ($khi-2$, Kolmogorov-Smirnov) peuvent être employés avant d'accepter ou de rejeter ce modèle théorique.

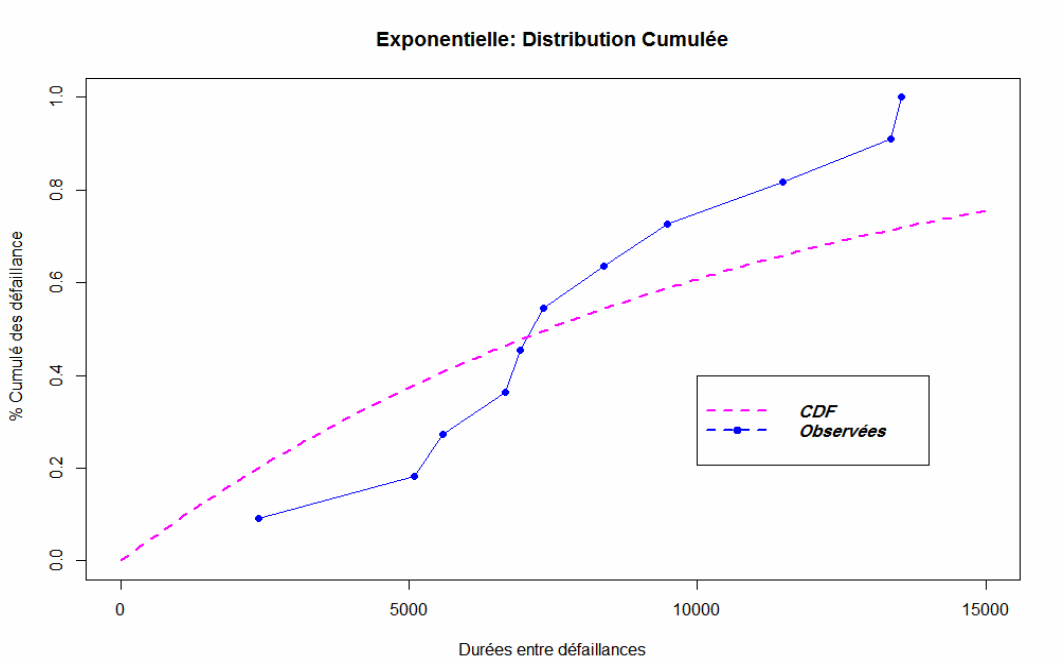


Figure III.3: Fonction de répartition de la distribution Exponentielle de la turbine à gaz examinée

On considère un ensemble complet de données de fiabilité de la turbine à gaz examinée, la statistique de Kolmogorov-Smirnov est la différence maximale entre la CDF empirique et la CDF théorique donnée par [48 , 59, 70, 96]:

$$D_n = \max_{1\le i\le n}\left\{\max\left(\left|F(t)-\frac{i}{n}\right|,\left|F(t)-\frac{i-1}{n}\right|\right)\right\} \qquad \text{(III.10)}$$

D' après le Tableau III.2 il est claire que le modèle exponentiel est rejeté au seuil de signification $\alpha = 0.2$ qui correspond au niveau de confiance de $(1-\alpha)$ 80 % d'après le teste d'Anderson Darling et il est rejeté au seuil de signification $\alpha = 0.1$ qui correspond au niveau de confiance de $(1-\alpha)$ 90 % d'après le tes de Kolmogorov-Smirnov. D'autres tests plus élaborées sont possibles.

Distribution Exponentielle					
Kolmogorov-Smirnov					
Taille de l'échantillon Statistique Valeur de P	11 0,37179994 0,07146423				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	0,30829	0,35242	0,39122	0,4367	0,4677
Rejeter?	Oui	Oui	Non	Non	Non
Anderson-Darling					
Taille de l'échantillon Statistique	11 1,7647018				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	1,3749091	1,9286236	2,501756	3,2891966	3,9074159
Rejeter?	Oui	Non	Non	Non	Non

Tableau III.2: Résultat de test d'ajustement

Comme conclusion sur ces résultats obtenus, on peut dire que le modèle exponentiel n'est pas le modèle adéquat à appliquer sur les données de fiabilité de la turbine.

III.2.4. Taux de défaillance

Le taux de défaillance (paramètre d'intensité) du modèle exponentiel est constant et est égale à $\lambda = 9.3642e-05$ dans le cas de turbine à gaz étudié, comme il est montré sur la Figure III.4.

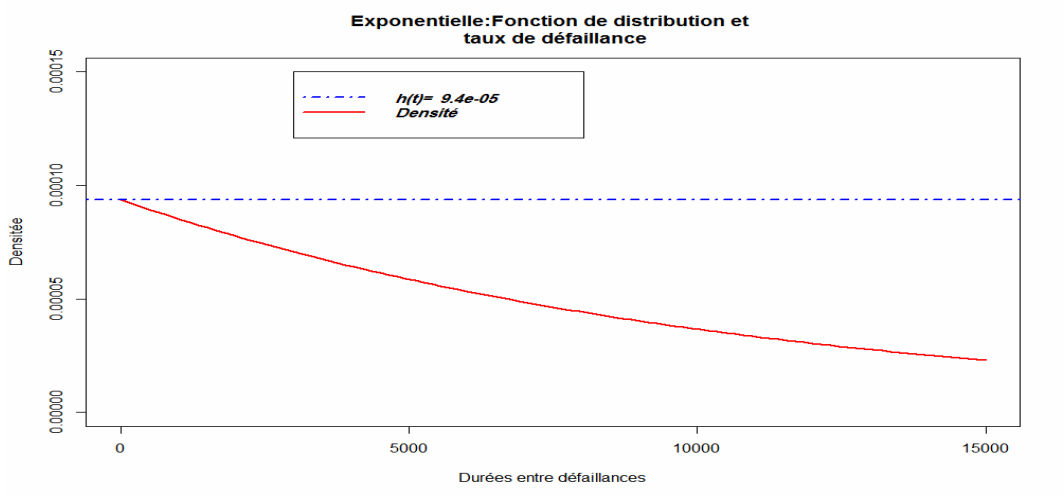


Figure III.4: Courbe de densité de loi Exponentielle et le taux de défaillance de turbine à gaz examinée

III.2.5. Fonction de distribution

Même si ce modèle n'est pas le modèle adéquat à appliquer sur ces données de fiabilité, on peut remarquer de la Figure III.4 et de la Figure III.5, que la probabilité de l'événement des défaillances et très importante dans la période de jeunesse et démunie progressivement ensuite. Des résultats statistiques supplémentaires sont présentés sur le Tableau III.3.

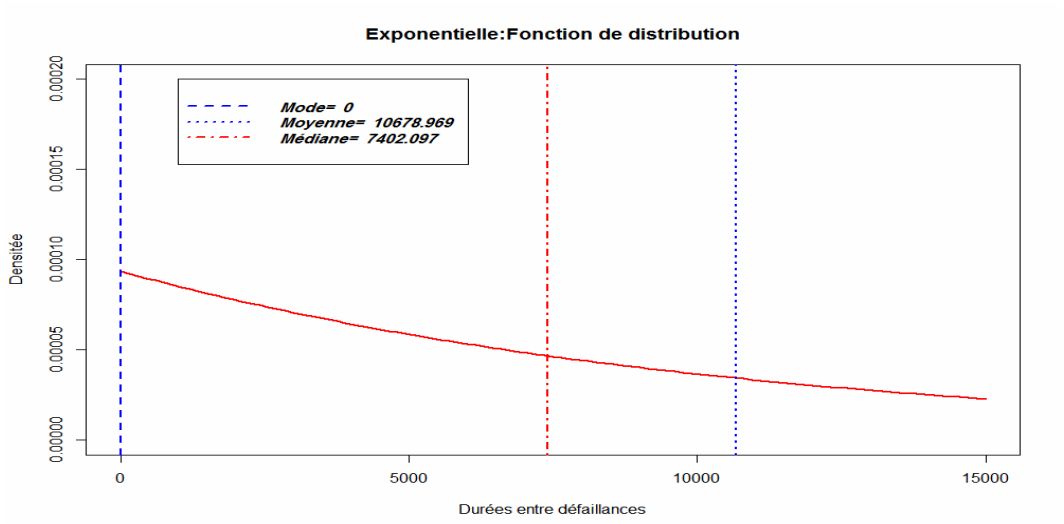


Figure III.5: Courbe de densité de la loi Exponentielle, mode, médiane et moyenne de turbine à gaz examinée

N°	Statistiques	Valeurs
1	Le taux de défaillance (Paramètre d'intensité)	λ = 9.3642e-05
2	Le paramètre d'échelle	$\beta = \frac{1}{\lambda}$ = 10678.97h
3	MTBF du système	10678.97h
4	La médiane de la distribution exponentielle avec le Paramètre d'intensité λ	(ln 2)/λ = 7402.097h
5	Le mode	Mod=0
6	La Moyenne (ou l'Esperance)	E(x)= $\frac{1}{\lambda}$ = 10678.97h
7	L'écart type du modèle	$\sigma = \frac{1}{\lambda^2} = 114040372$
8	Le coefficient de dissymétrie (skewness)	$\gamma_1 = 2$
9	Le coefficient d'aplatissement (kurtosis)	$\beta_2 = 6$

Tableau III.3: Résultats statiques obtenues de turbine à gaz examinée par le modèle exponentiel

III.3. Distribution normal

La distribution normale qui est d'usage général, également connue sous le nom de la distribution gaussienne, elle est largement utilisée, car les applications industrielles génèrent fréquemment des données qui sont normalement distribués. Cependant, la distribution normale est peu utilisée pour modéliser les données de fiabilité en comparaison avec les autres distributions, en partie, parce que sa queue gauche se prolonge à l'infini négatif, ce qui pourrait causer la modélisation incorrecte des temps de défaillances négatifs. Mais elle peut représenter de sévères mécanismes d'usure en raison de la croissance rapide de sa fonction de risque (taux de défaillance). La densité de distribution normal est donnée par:

$$f(T) = \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{T-\bar{T}}{\sigma_T}\right)^2} \qquad \text{(III.11)}$$

Avec $f(T) \geq 0$, $-\infty < T < +\infty$, $-\infty < \bar{T} < +\infty$, σ_T

Où : $\overline{T} = \mu$ est la moyenne de la distribution normale des temps de défaillances et σ_T est l'écart type de la distribution normale des temps de défaillances.

C'est une distribution à deux paramètres $\overline{T}$ (Moyenne de la distribution) et σ_T (l'écart type). Certaines des caractéristiques spécifiques de la densité de loi normale sont les suivantes:

- L'un des deux paramètres, la moyenne $\overline{T}$ ou la durée de vie moyenne ou la MTBF, T, est également le paramètre de localisation du PDF normal, car il localise le PDF en abscisse. La densité de loi normale est en forme de cloche et elle est symétrique autour de sa moyenne,
- Le second paramètre est l'écart type σ_T , qui est aussi le paramètre d'échelle de la densité de la distribution normal. quand σ_T diminue, la courbe de la densité est poussé vers la moyenne, ou elle devient plus étroite et plus haute, étirée vers le haut. Et quand σ_T augmente, la courbe s'étale loin de la moyenne, ou elle devient plus large et moins profonde,
- La distribution normale a une moyenne qui est égale à la médiane et est égale au mode. Ce qui signifie qu'elle présente une symétrie parfaite.

III.3.1. Détermination des paramètres

La distribution normale a deux paramètres à déterminer, comme il est indiqué dans le paragraphe précédent, ces paramètres sont :

III.3.1.1. La moyenne de la distribution normale $\overline{T}$

Elle n'est autre que l'abscisse T_{50} du point d'intersection de la droite d'ajustement des données avec la droite qui représente le quantile à 50% Q_{50}, cette valeur peut être lue directement sur la Figure III.6, $T_{50} = \hat{T} = 8203.273\text{h}$.

III.3.1.2. L'écart type σ_T

Pour déterminer le deuxième paramètre, deux équations peuvent être utilisées [50]:

$$\hat{\sigma}_T = \frac{T(84\% <) - T(15.9\% <)}{2}$$
$$\hat{\sigma}_T = \frac{T(97.7\% <) - T(2.3\% <)}{4} \qquad \text{(III.12)}$$

En utilisant l'équation (III.12) de $T(84\% <) = 12053.92\text{h}$ et $T(15.9\% <) = 4352.63\text{h}$, l'écart type σ_T est obtenu par la formule suivante:

$$\hat{\sigma}_T = \frac{T(84\% <) - T(15.9\% <)}{2} = \frac{12053.92 - 4352.63}{2} = 3850.642\ \text{h}$$

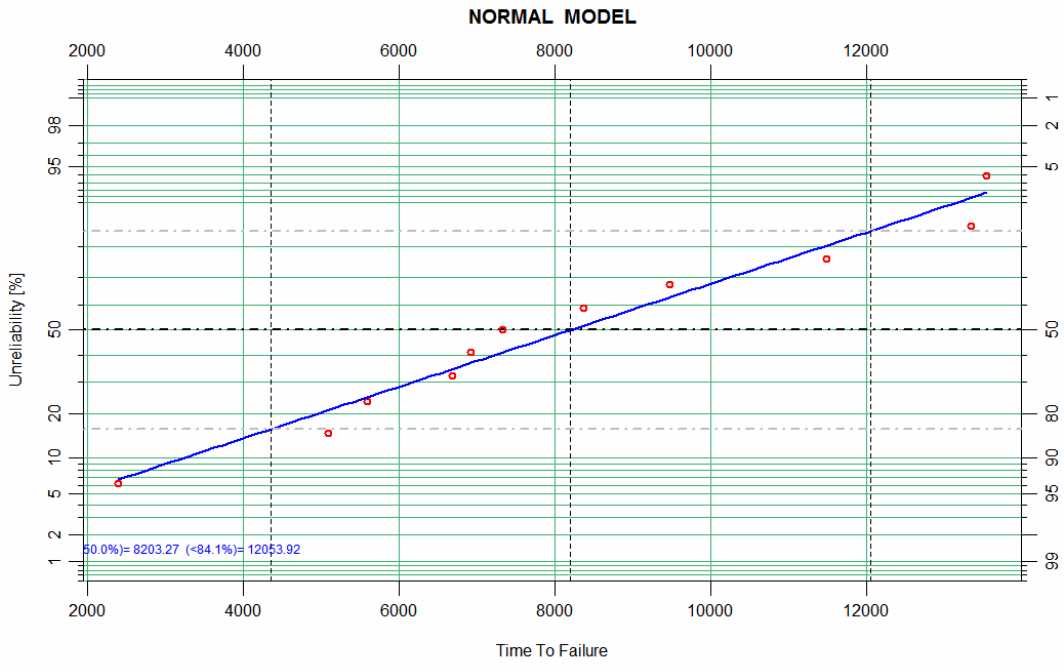


Figure III.6: Traçage des données de fiabilité de turbine examinée sur un papier de probabilité normale et de la droite d'ajustement

Les résultats peuvent être affectés par des erreurs de lecture et d'ajustement visuel des données par la droite d'ajustement.

Parametres	$T(15.9\% <)$	$T(50\% <)$	$T(84\% <)$	$\hat{T}$	$\hat{\sigma}_T$
Valeurs	4352.63h	8203.273h	12053.92h	8203.273h	3850.642h

Tableau III.4: Paramètre du modèle Normal de fiabilité de turbine à gaz examinée

III.3.2. Fonction de répartition

Apres la détermination des paramètres on peut facilement tracer la fonction de répartition de la distribution normale qui ajuste les données de fiabilité. En utilisant l'équation (III.13), suivante:

$$F(t) = \frac{1}{2}\left(1 + \text{erf}\ \frac{t - \overline{T}}{\sigma_T \sqrt{2}}\right) \qquad \text{(III.13)}$$

La fonction *erf* est la fonction d'erreur (aussi appelée fonction d'erreur de Gauss) qui fait partie des fonctions spéciales, elle est définie par :

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} \, \mathrm{d}t \qquad \text{(III.14)}$$

D'après les Figures III.6 et III.7 on peut constater que le modèle ajuste très bien les données de fiabilité de la turbine. L'inconvenant de l'utilisation de cette loi apparaît clairement dans la Figure III.7, on remarque que la courbe n'a pas une valeur nulle au début des temps d'observation. Cela signifie que cette distribution attribue des valeurs de probabilité non nulles pour des temps d'observation négatifs allant jusqu' à $-\infty$.

Des probabilités pour des temps d'observation négatif peuvent indiquer que les défaillances ont eu lieu avant le début des observations, à savoir pendant la production, le stockage, le transport, au stage de la commande avant le début d'une mission, ou avant l'utilisation réelle. Mais on ne peut pas dire que c'est le cas, car les temps d'observation s'étalent jusqu'à $-\infty$. En effet, l'intégral de la densité de 0 à $+\infty$ n'est jamais égale a 1 dans ce cas, la réponse est montré sur la Figure III.8.

Contrairement à la distribution exponentielle, la distribution normale présente un taux de défaillance croissant, comme il est montré sur la Figure III.9, ce qui est un concept intuitif causée par l'usure du système.

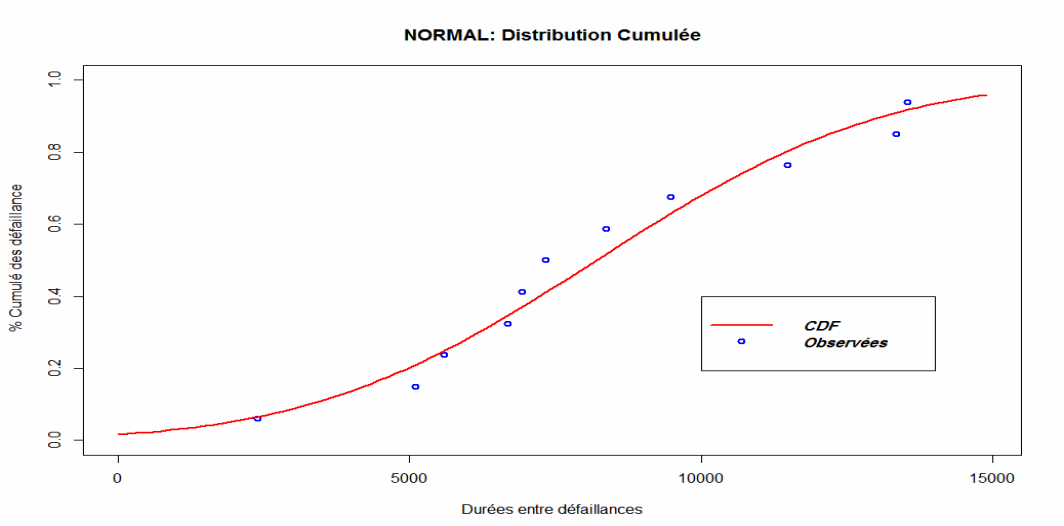


Figure III.7: Réponse de distribution des données de fiabilité de la turbine et de la courbe de la fonction de répartition du modèle de distribution normale

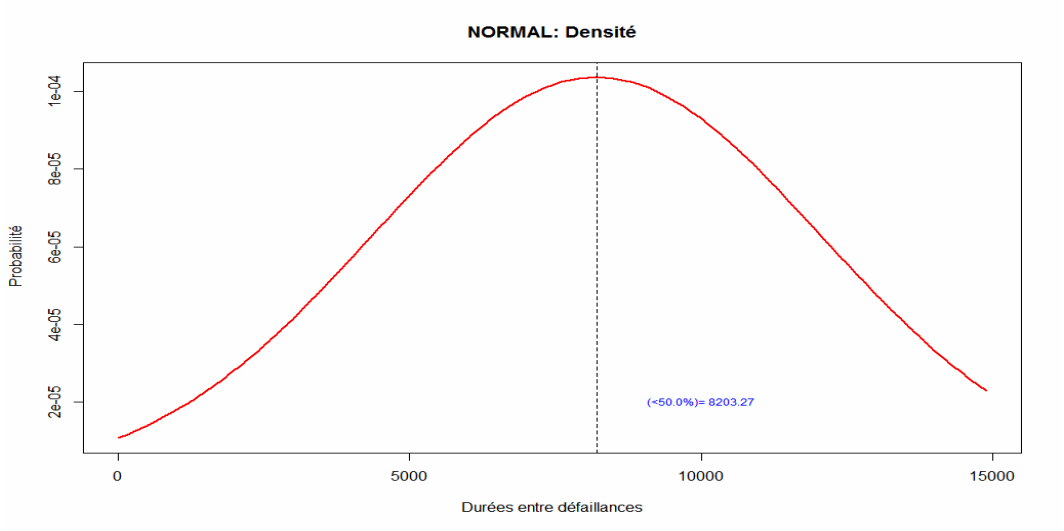


Figure III.8: Courbe de la densité de distribution normale

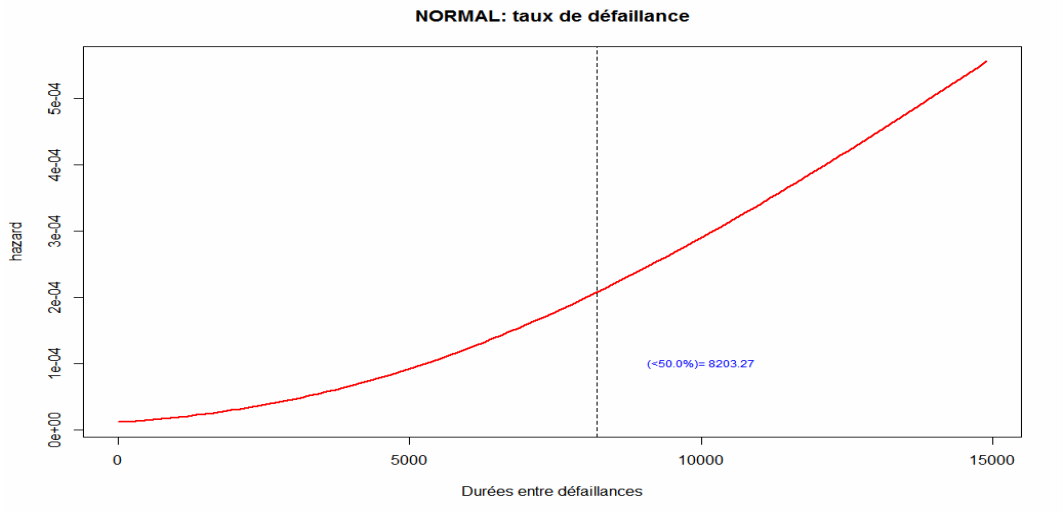


Figure III.9: Courbe du taux de défaillance de distribution normale

Le résultat présenté sur la Figure III.9, confirme le fait que système est en dégradation. Ce fait peut être déduit aussi dans la Figure III.1 du graphe TTT obtenu par les données de fiabilité de turbine à gaz examinée, qui présente une concavité.

Comme conclusion sur les résultats obtenus par la distribution normale, résumé sur les Tableaux III. 5 et III.6, on peut conclure que, en ne tenant pas compte de l'inconvénient de la distribution normale dans le domaine de la fiabilité, elle peut très bien modéliser les données de fiabilité de la turbine examinée. En plus, cette bonne représentation indique que la turbine présente un sévère mécanisme d'usure.

	Statistiques	Valeurs
3	MTBF du système	$\mu =$ 8203.273 h
4	La médiane de la distribution normale avec les Paramètres $\mu =$ 8203.273 et $\sigma =$ 3850.642	médiane= 2074.7 h
5	Le mode	Mod= μ
6	La Moyenne (ou l'Esperance)	E(x)= $\mu =$ 8203.273h
7	L'écart type du modèle	$\sigma = 3850.642$
8	Le coefficient de dissymétrie (skewness)	$\gamma_1 = 0$
9	Le coefficient d'aplatissement (kurtosis)	$\beta_2 = 0$

Tableau III.5: Résultats statistiques obtenues de la turbine examinée par le modèle normal

Distribution Normal					
Kolmogorov-Smirnov					
Taille de l'échantillon Statistique Valeur de P	11 0,14389788 0,95261446				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	0,30829	0,35242	0,39122	0,4367	0,4677
Rejeter?	Non	Non	Non	Non	Non
Anderson-Darling					
Taille de l'échantillon Statistique	11 0,24632441				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	1,3749091	1,9286236	2,501756	3,2891966	3,9074159
Rejeter?	Non	Non	Non	Non	Non
Khi-Carré					
Degrés de liberté Statistique Valeur de P	1 0,12345974 0,725312				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	1,6423744	2,7055435	3,8414588	5,4118944	6,6348966
Rejeter?	Non	Non	Non	Non	Non

Tableau III.6: Résultat de test d'ajustement

III.4. Loi normale tronquée

Pour remédier à l'inconvénient de la loi normale dans la modélisation des données de fiabilité, une transformation de cette loi peut être utilisée. Cette transformation consiste à changer le domaine de définition de la distribution en le limitant aux valeurs strictement positives des temps d'observations. En effet, la distribution normale tronque est une des modifications possible de la distribution normal qui assure cette transformation.

La fonction de densité de probabilité de la distribution normale tronquée est définie en deux étapes. Apres la détermination des paramètres μ et σ^2 de la fonction de densité de la distribution normale, une plage de troncature (a,b) est établie afin de répondre au besoin de l'utilisateur. La fonction de densité de probabilité associée à la distribution normale est modifiée par la fixation de ses valeurs hors de la plage à zéro, et elle est uniformément mise à l'échelle dans la plage de sorte que l'intégrale totale soit égale à 1, donnée par la formule suivante:

$$\psi(\overline{\mu},\overline{\sigma},a,b;t)=\begin{cases}0 & si \quad t\le a\\ \dfrac{\phi(\overline{\mu},\overline{\sigma}^2;t)}{\Phi(\overline{\mu},\overline{\sigma}^2;b)-\Phi(\overline{\mu},\overline{\sigma}^2;a)} & si \quad a\prec t<b\\ 0 & si \quad b\le t\end{cases} \qquad \text{(III.15)}$$

Où: $\phi(\overline{\mu},\overline{\sigma}^2;t)$ est égale à $N(\mu,\sigma)$.

Dans le cas des données de fiabilité les valeurs de (a,b), sont $a=0, b=+\infty$, la formule (III.15) devine:

$$\psi(\overline{\mu},\overline{\sigma},0,+\infty;t)=\begin{cases}0 & si \quad t\le 0\\ \dfrac{\phi(\overline{\mu},\overline{\sigma}^2;t)}{\Phi(\overline{\mu},\overline{\sigma}^2;+\infty)-\Phi(\overline{\mu},\overline{\sigma}^2;0)} & si \quad t\ge 0\end{cases} \qquad \text{(III.16)}$$

De ce fait, la fonction de fonction de répartition devient :

$$\Psi(\overline{\mu},\overline{\sigma},0,+\infty;t)=\frac{\Phi(\overline{\mu},\overline{\sigma}^2;t)-\Phi(\overline{\mu},\overline{\sigma}^2;0)}{\Phi(\overline{\mu},\overline{\sigma}^2;+\infty)-\Phi(\overline{\mu},\overline{\sigma}^2;0)} \qquad \text{(III.17)}$$

La droite d'ajustement et la courbe correspondante de la distribution normale tronquée sont montrées sur la Figure III.10.

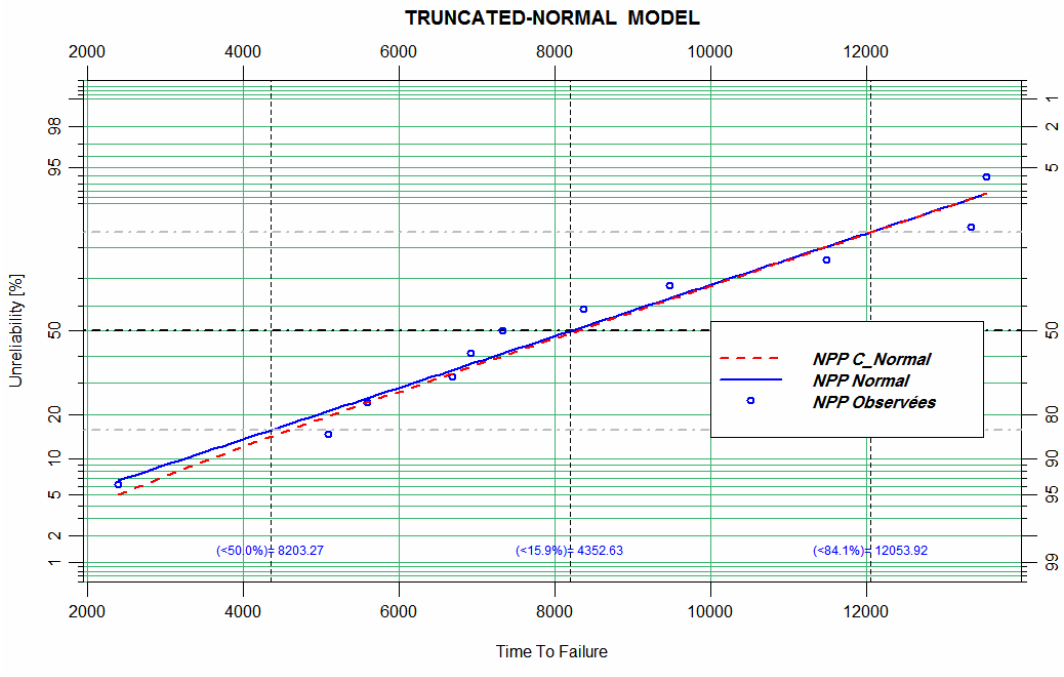


Figure III.10 Traçage de la droite d'ajustement et la courbe correspondante de la distribution normale tronqué

III.4.1. Détermination des paramètres

Pour la détermination des paramètres on utilise la méthode graphique suivie dans le cas de la loi normal. Les deux paramètres $\overline{T}$ (Moyenne de la distribution) et σ_T (l'écart-type) sont déterminés comme si la distribution suit la distribution normale paragraphe III.3.1. Une fois les paramètres déterminés, on applique les transformations vers la distribution normale tronquée indiquées par les équations (III.16) et (III.17) pour tracer la fonction de répartition, cette fonction est montrée sur la Figure III.11, la Figure III.12 montre la fonction de fiabilité et la fonction de densité est donnée par la Figure III.13.

III.4.2. Fonction de répartition

Il peut être constaté sur la Figure III.11, que la transformation de la distribution normale a introduit une modification sur la répartition, surtout pour les temps d'observation (à faibles valeurs) c'est à dire une nette amélioration de la représentation des données.

Pour la fonction de fiabilité est montrée sur le graphe de la Figure III.12, ces modifications se basent sur le fait que la fiabilité du système doit commencer par 1, c'est à dire une fiabilité totale (un système nouveau et non dégradé).

Les deux courbes sont presque superposées dans le reste de l'intervalle des temps d'observation. Vu que les modifications concernent le décalage des valeurs de probabilité des valeurs négatives de la densité normale vers l'intervalle des temps positifs. Cette observation se manifeste par un prolongement de la courbe de densité vers le haut dans la Figure III.13, pour compenser l'intégrale de 0 à $+\infty$ de la densité la distribution normale à 1. Le degré de troncature pour cette turbine examinée est [50] $\Phi\left(\frac{-\mu}{\sigma}\right) = 0.0166$, soit 1.66%.

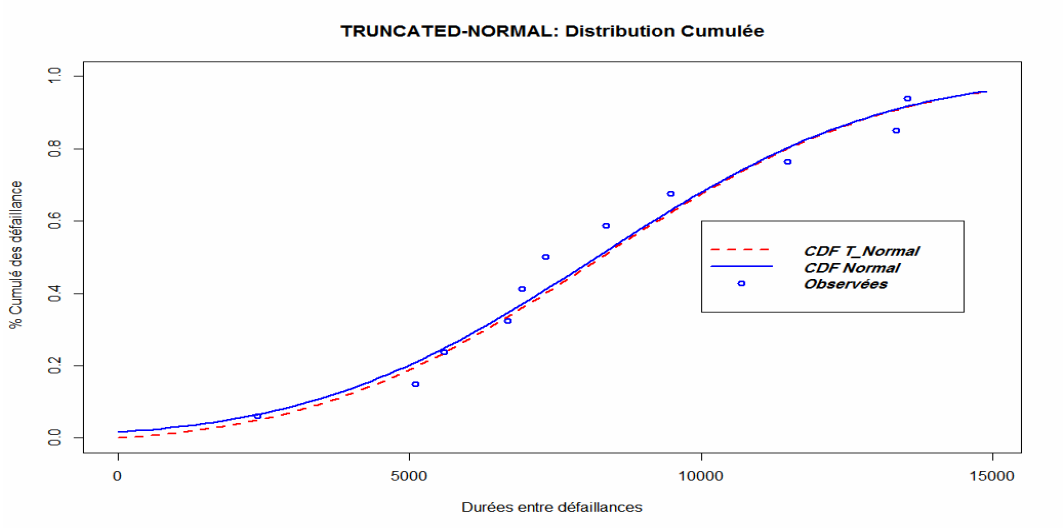


Figure III.11: Fonction de répartition de distribution normale et de distribution normale tronquée

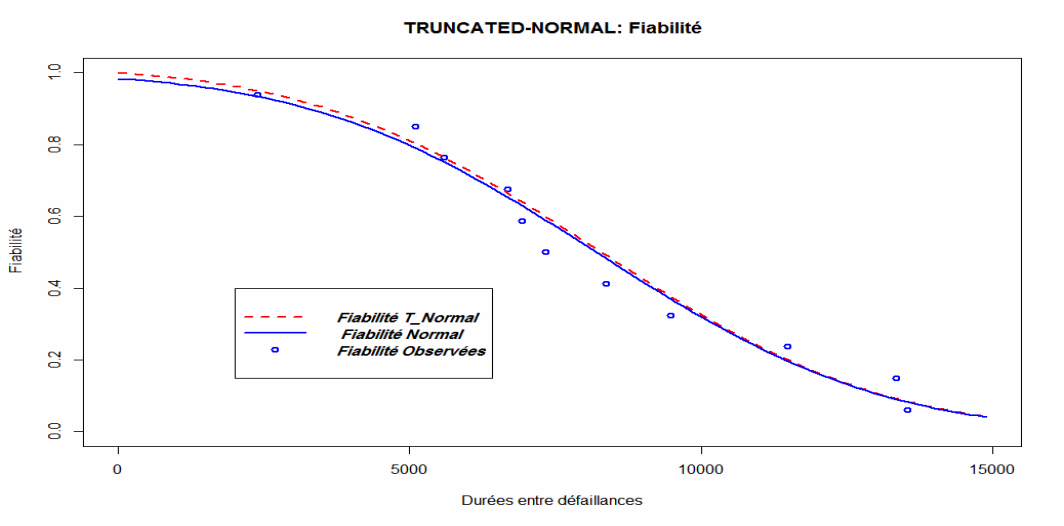


Figure III.12: Fiabilité suivant le modèle de distribution normale et de distribution normale tronquée

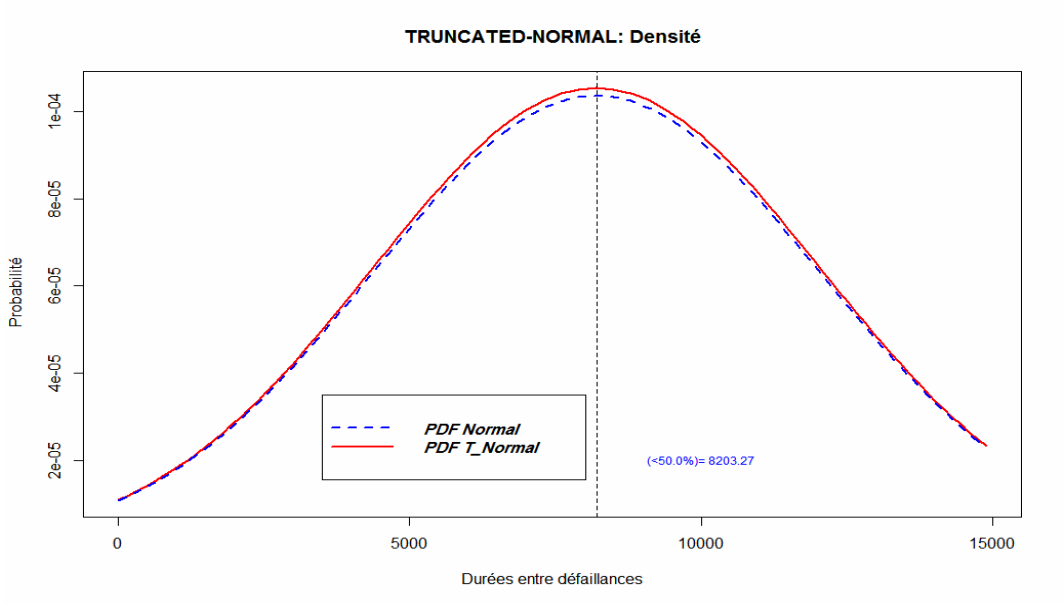


Figure III.13: Densité suivant le modèle de distribution normale et de distribution normale tronquée

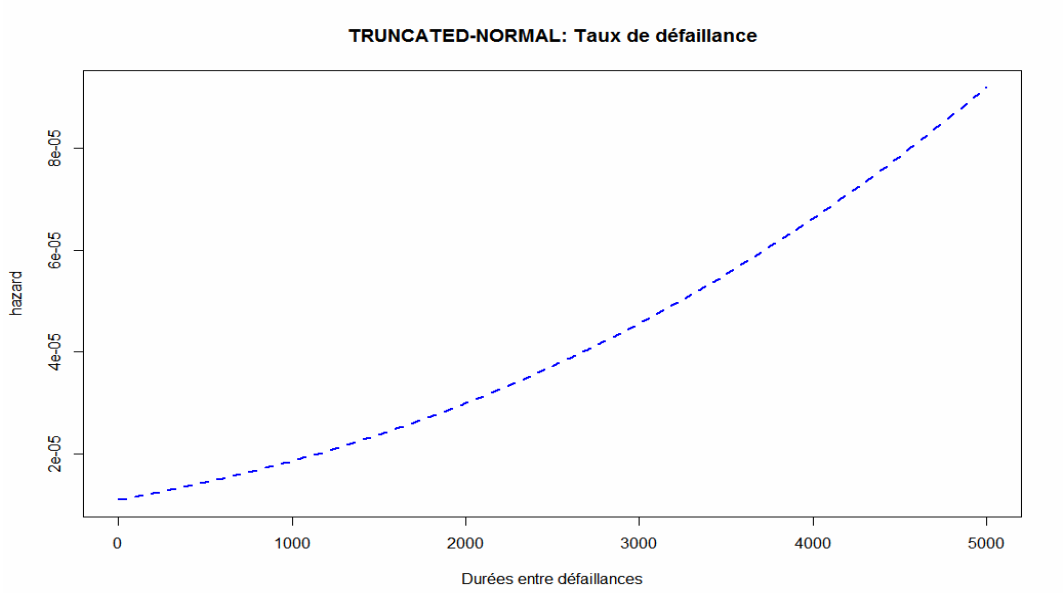


Figure III.14: Taux de défaillance suivant le modèle de distribution normale et de distribution normale tronquée

III.4.3. Taux de défaillance

Le taux de défaillance de la distribution normale tronquée et donnée par [50]:

$$\lambda(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\left(1-\Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma^2}\right)\right)^{-1}\exp\left\{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \qquad \text{(III.18)}$$

Il peut être démontré que ce taux de défaillance croit et approche asymptotiquement une ligne droite, tel que défini par [74]:

$$\lim_{t\to\infty}\lambda(t)=\sigma^{-2} \tag{III.19}$$

Si $\mu+3\sigma>>0$, alors la distribution normale tronquée coïncide pratiquement pour $t\succ 0$ avec la distribution normale standard correspondante, qui est connue pour avoir un taux défaillance croissant et c'est le cas pour la turbine examinée [90].

Comme conclusion sur les résultats obtenus, on peut dire que la distribution normale tronquée peut être un modèle très adéquat pour modéliser les données de fiabilité de la turbine examinée.

III.5. Distribution Log Normale

Comme on peut le déduire par son nom, la distribution log-normale est une distribution flexible qui est étroitement liée à la distribution normale [15]. Mathématiquement, une variable aléatoire est log-normalement distribuée si le logarithme de la variable aléatoire est normalement distribué.

La distribution Log-Normale est couramment utilisée pour modéliser la durée de vie des unités dont les modes défaillance sont de nature « fatigue », liés aux stress mécaniques. Comme elle peut être particulièrement utile pour la modélisation des données qui sont presque symétriques ou asymétriques à droite. La densité de la distribution log-normale à deux paramètres est donnée par :

$$\begin{aligned} &f(T)=\frac{1}{T\sigma_{T'}\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{T'-\overline{T}'}{\sigma_{T'}}\right)^2}\\ &f(T)\geq 0, T\geq 0, -\infty<T'<+\infty, \sigma_{T'}>0\\ &T'=\ln(T)\end{aligned} \tag{III.20}$$

Avec:

- Les valeurs de T sont les temps de défaillances,
- $\mu'=\overline{T}'$ la moyenne des logarithmes naturels de temps de défaillances,
- $\sigma_{T'}$ l'écart-type des logarithmes naturels de temps de défaillances.

La distribution de log-normale peut avoir de très différentes apparences en fonction de son paramètre d'échelle.

III.5.1. Détermination des paramètres

Les deux paramètres sont à considérer par les méthodes d'estimations:

III.5.1.1. Paramètre $\overline{T}'$

La durée de vie moyenne, ou le MTBF en termes de logarithme des temps de défaillance T est également le paramètre d'échelle, et non pas le paramètre de localisation comme dans le cas de la densité de la distribution normal, T peut prendre des valeurs de $-\infty < T < +\infty$.

III.5.1.2. Paramètre $\sigma_{T'}$

L'écart type des T', est également le paramètre de forme et non pas un paramètre d'échelle, comme dans le cas de la densité de la distribution normal, et ne prend que des valeurs positives [50].

Pour estimer les valeurs de ces paramètres, les données de fiabilité de la turbine sont tracées sur un papier de traçage de probabilité Log-Normale en utilisant les rangs médians, comme il est montré sur Figure III.15. Le traçage de fonction de distribution cumulative de la distribution Log-Normale sur papier de traçage de probabilité Log-Normal est montré sur cette Figure.

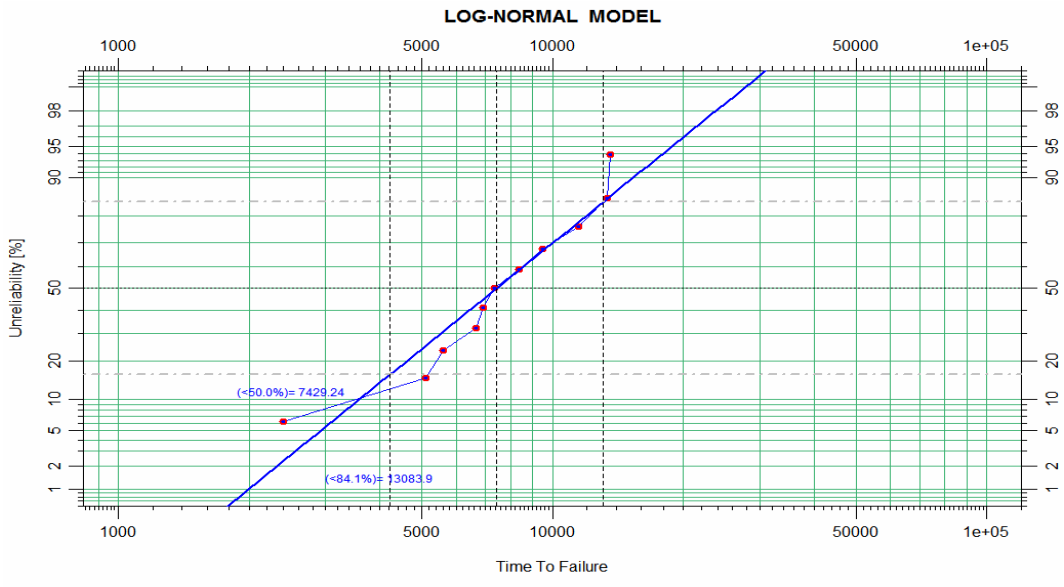


Figure III.15: Traçage de la fonction de distribution cumulative de la distribution Log-Normale sur papier de traçage de probabilité Log-Normal

Les points tracés sont ajustés par une droite pour permettre l'estimation des paramètres suivant les étapes suivante :

1. **Moyenne de la distribution log-normale** $\overline{T}'$

Elle n'est autre que le logarithme de l'abscisse T_{50} du point d'intersection de la droite d'ajustement des données avec la droite qui représente le quantile à 50% Q_{50}, cette valeur peut être lue directement sur la Figure III.15, avec $\hat{\overline{T}}' = \ln(T_{50}) = \ln(\hat{T}) = 8.913179$.

2. **L'écart type** $\sigma_{T'}$

Pour déterminer le deuxième paramètre trois formules peuvent être utilisées :

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{T'} &= \frac{T'(84.1\% <) - T'(15.9\% <)}{2} \\ \hat{\sigma}_{T'} &= \frac{T'(97.7\% <) - T'(2.3\% <)}{4} \\ \hat{\sigma}_{T'} &= \frac{T'(99.865\% <) - T'(0.135\% <)}{6} \end{aligned} \qquad \text{(III.21)}$$

En utilisant la 1er équation du (III.21), $T(84.1\% <) = 13083.9\text{h}$ et $T(15.9\% <) = 4218.439\text{h}$, on détermine l'écart type $\sigma_{T'}$, comme suite:

$$\hat{\sigma}_T = \frac{T'(84.1\% <) - T'(15.9\% <)}{2} = \frac{\ln(13083.9) - \ln(4218.439)}{2} = 0.5659586$$

Les résultats peuvent être affectés par des erreurs de lecture et d'ajustement visuel des données par la droite d'ajustement, ces résultats sont présentés sur le Tableau III.6.

Paramètres	$T(15.9\% <)$	$T(50\% <)$	$T(84\% <)$	$\hat{\overline{T}}'$	$\hat{\sigma}'_T$
Valeurs	4218.439h	7429.241 h	13083.9h	Log(7429.241) = 8.913179	0.5659586

Tableau III.6: Résultats des paramètres estimés

III.5.2. Fonction de répartition et fonction de survie

Du tracé sur le papier log-normale, comme il est montré sur la Figure III.15, il est clair, visuellement, que l'ajustement des points ne concorde pas très bien surtout dans les extrémités de la plage des temps d'observation. Cela se traduit par une mauvaise représentation des ces données par ce modèle, comme il est montré sur la Figure III.16 qui représente la distribution cumulée et sur la Figure III.17 qui représente la fonction de survie. En appliquant les tests d'ajustement Tableau III.8 en remarque que ce modèle n'est pas rejeté.

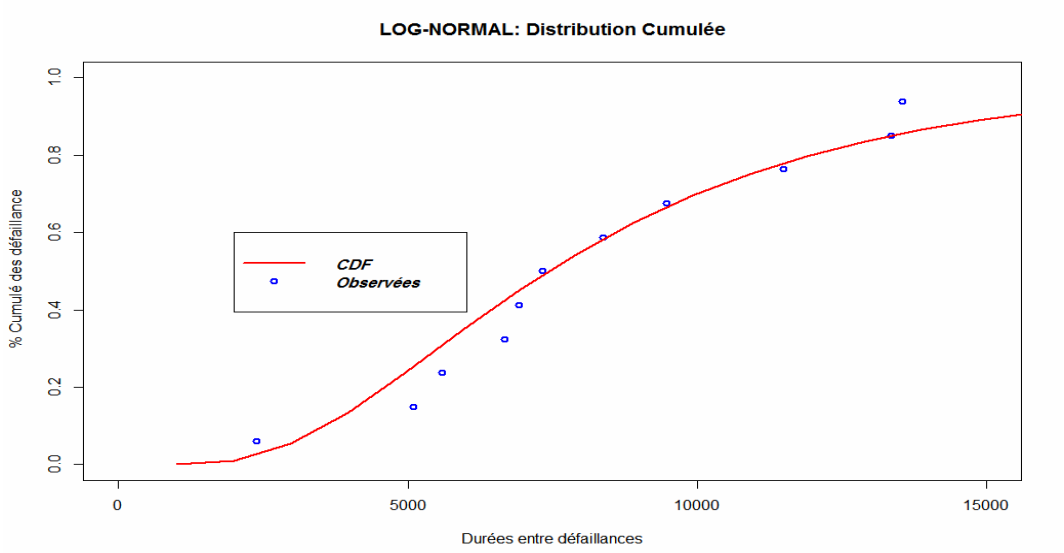


Figure III.16: Fonction répartition Log-Normal des données de fiabilité de turbine examinée

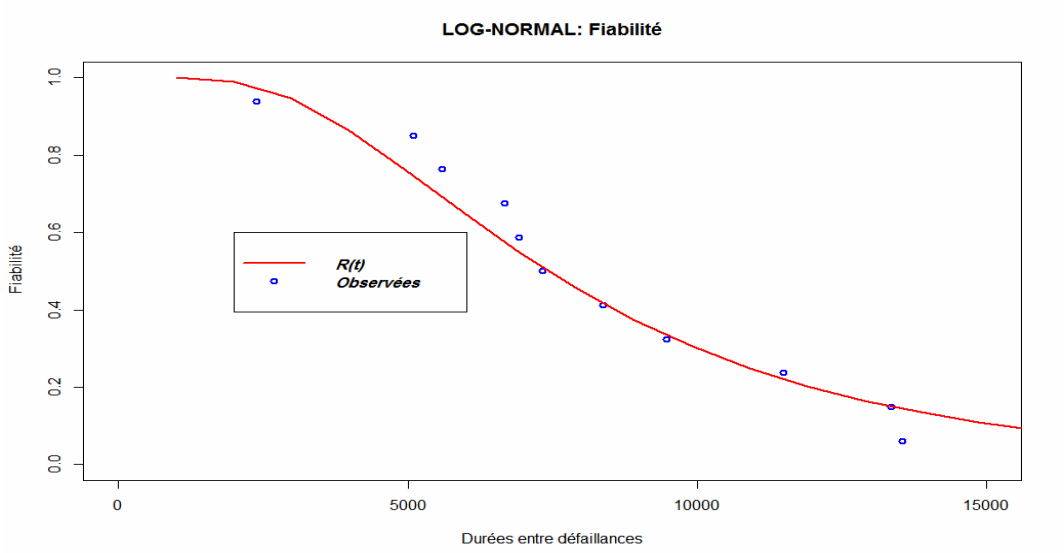


Figure III.17: Fiabilité de turbine suivant le modèle Log-Normal

III.5.3. Taux de défaillance

La densité Log-Normal des données de fiabilité de la turbine est montrée sur la Figure III.18, une croissance rapide du taux de défaillance peut être observée sur Figure III.19. Le taux de défaillance atteint un maximum puis décroît progressivement. Pour une distribution très asymétrique, $\sigma_{T'} \succ 0{,}798$, $\lambda(t)$ atteint un pic entre la médiane et le mode; puis elle diminue progressivement. Cela se produit avant même que la moitié de la population tombe en panne (temps d'occurrence des pannes).

Si l'asymétrie est beaucoup moins importante, avec $\sigma_{T'} \prec 0{,}798$, il y a encore un maximum, mais il se produit au-delà de la durée de vie médiane et même au-delà de la durée de vie moyenne. Cela signifie que le risque de défaillance commence presque nul et augmente rapidement jusqu'à entre la médiane et la moyenne des temps de défaillances et il commence à diminuer progressivement. Ce qui est le cas pour les données de la turbine, car $\hat{\sigma}_{T'} = 0.565$, le maximum et au-delà de la moyenne Figure III.19.

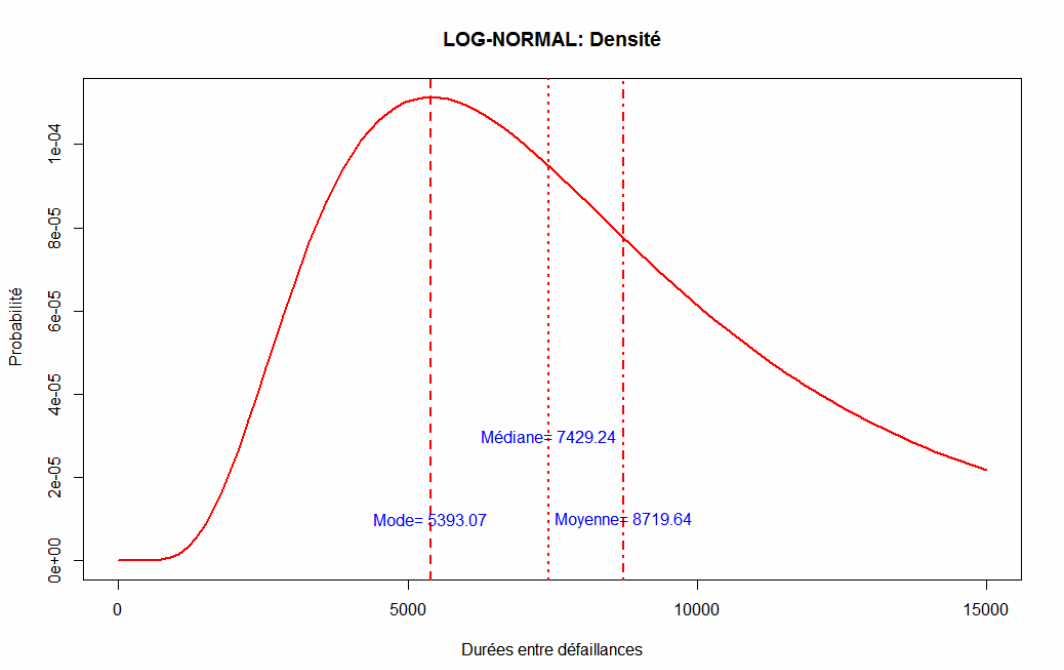


Figure III.18: Densité Log-Normal des données de fiabilité de la turbine

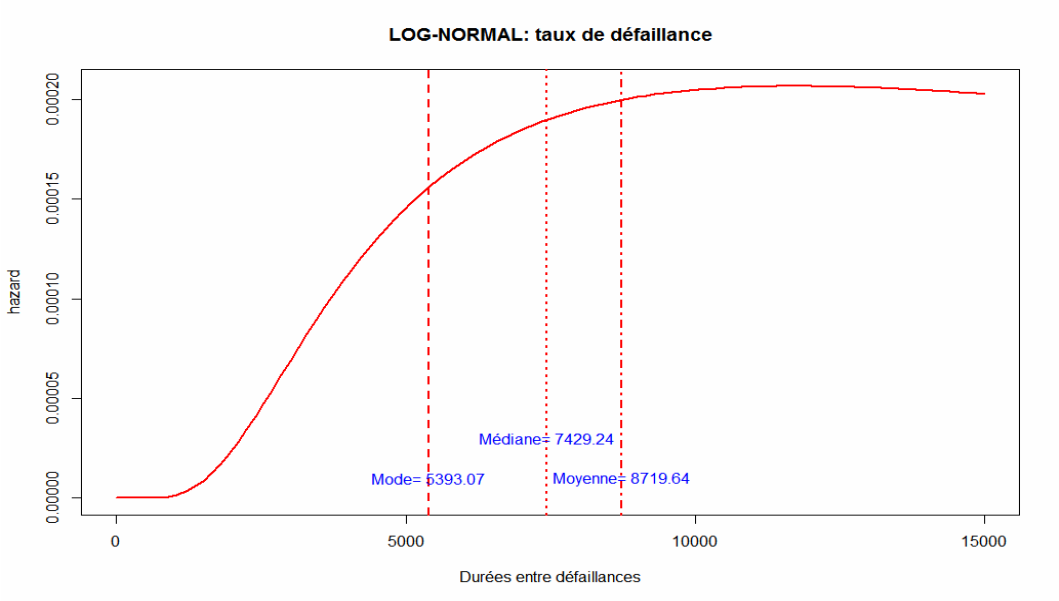


Figure III.19: Tracé du taux de défaillance Log-Normal des données de fiabilité de turbine

	Statistiques	Valeurs
1	MTBF du système	$\mu =$ 8719.642h
2	La médiane de la distribution Log-normale avec les Paramètres $\mu' =$ 8.913179 et $\sigma' =$ 0.5659586	médiane= 7429.24h
3	Le mode	Mod=5393.069h
4	La Moyenne (ou l'Esperance)	E(x)= $\mu = e^{\mu' + \frac{1}{2}\sigma'^2}$ =8719.642h
5	l'écart-type du modèle	$\sigma' = 0.5659586$
6	Le coefficient de dissymétrie (skewness)	$\gamma_1 = 2.075351$
7	Le coefficient d'aplatissement (kurtosis)	$\beta_2 = 11.52229$
8	l'écart-type du modèle des données de fiabilité	$\sigma = 5357.819$

Tableau III.7: Résultats statistiques obtenus

Log-normale					
Kolmogorov-Smirnov					
Taille de l'échantillon Statistique Valeur de P	11 0,16177423 0,89264305				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	0,30829	0,35242	0,39122	0,4367	0,4677
Rejeter?	Non	Non	Non	Non	Non
Anderson-Darling					
Taille de l'échantillon Statistique	11 0,36545924				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	1,3749091	1,9286236	2,501756	3,2891966	3,9074159
Rejeter?	Non	Non	Non	Non	Non

Tableau III.8: Tests d'ajustement du modèle Log-Normale

Comme conclusion sur les résultats obtenues en utilisant le modèle Log-Normale, du tableau III.8, on peut dire que ce modèle est acceptable même si visuellement l'ajustement des données de défaillance n'apparaît pas très bien sur les Figures III.15 , III.16 et III.17.

L'ajustement des logarithmes des temps de défaillance dans l'estimation des paramètres introduit une erreur importante par rapport à l'ajustement de la fonction de répartition directement en utilisant les méthodes numériques.

Par contre, on peut toujours utiliser les paramètres estimés par la méthode graphique comme valeurs initiales pour les méthodes numériques telles que la méthode des moindres carrés non linéaires (nonlinear least-squares) ce qui aide à la convergence de ces méthodes, comparaison présentée sur le Tableau III.9 et la Figure III.20.

	Méthode graphique	Méthode des moindres carrés non linéaires
RMSE	0.05731848	0.03628091
MSE	0.003285408	0.001316305

Tableau III.9: Comparatif entre méthode graphique et numérique

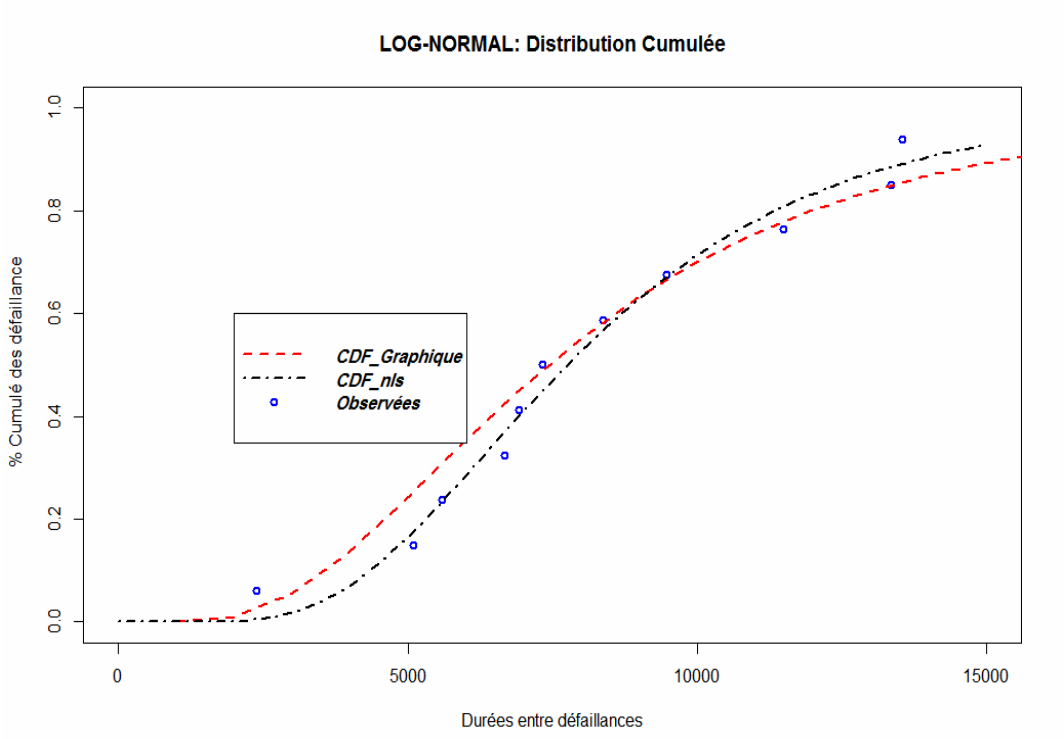


Figure III.20: Fonction de répartition a)- paramètres estimés par la méthode graphique

b)- paramètres estimés par la méthode des moindres carrés non linéaires

III.6. Distribution de Weibull

La distribution de Weibull qui est une distribution de variable continue introduite par Waloddi WEIBULL [70 ,91,100, 108]. Cette distribution est utilisée pratiquement dans tous les domaines d'engineering de la fiabilité en raison des nombreuses formes qu'elle peut avoir.

Les modèles de Weibull ont été utilisés dans de nombreuses applications différentes et pour résoudre une variété de problèmes de nombreuses disciplines différentes. Un petit échantillon de l'application de modèles de Weibull est donné par [100, 103].

Le modèle Weibull appliqué à une turbine à gaz examinée est montré sur la Figure III.21, la distribution cumulée est montrée sur la Figure III.22, et la fonction de densité de la distribution de Weibull est montrée sur la Figure III.23, et la Figure III.24 montre le taux de défaillance de cette turbine à gaz examinée. Aussi, les résultats statistiques obtenus en utilisant le modèle de Weibull appliquées à la turbine à gaz examinée sont montré dans le Tableau III.10 et les résultats du test Kolmogorov Smirnov sont donnés dans le Tableau III.11.

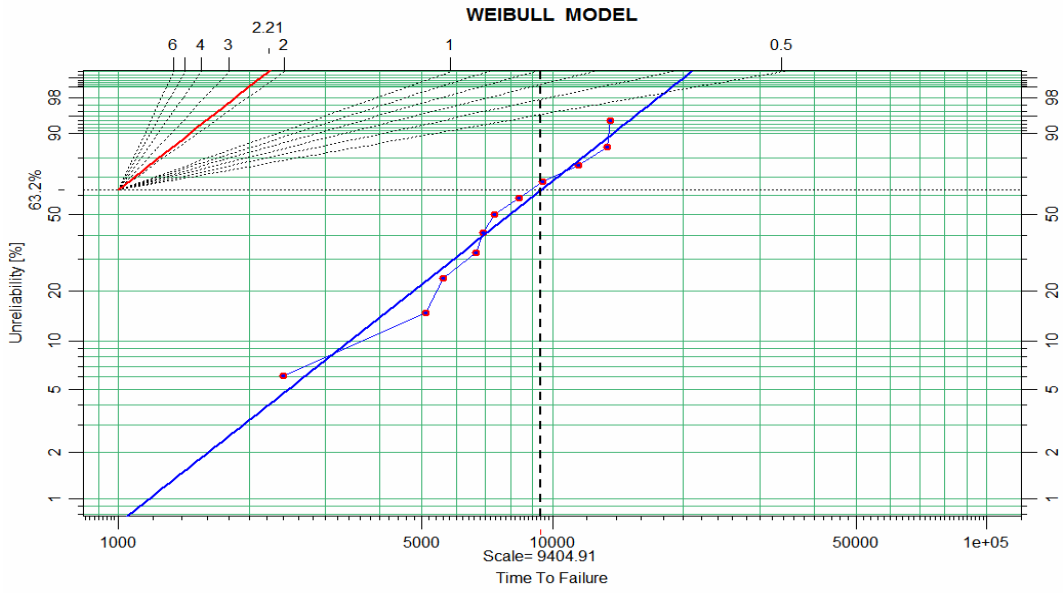


Figure III.21: Modèle Weibull appliquée à une turbine à gaz examinée

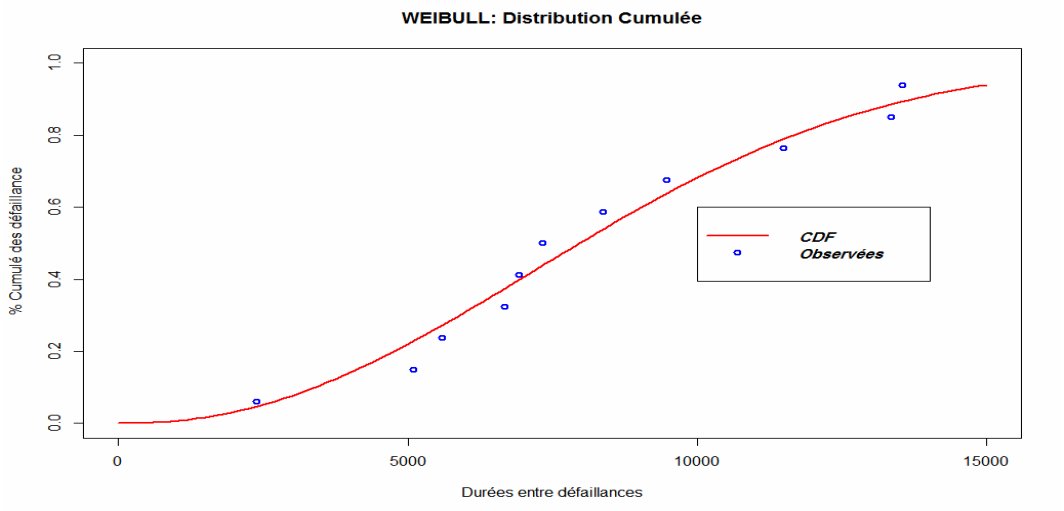


Figure III.22: Distribution cumulée des données de la turbine à gaz examinée

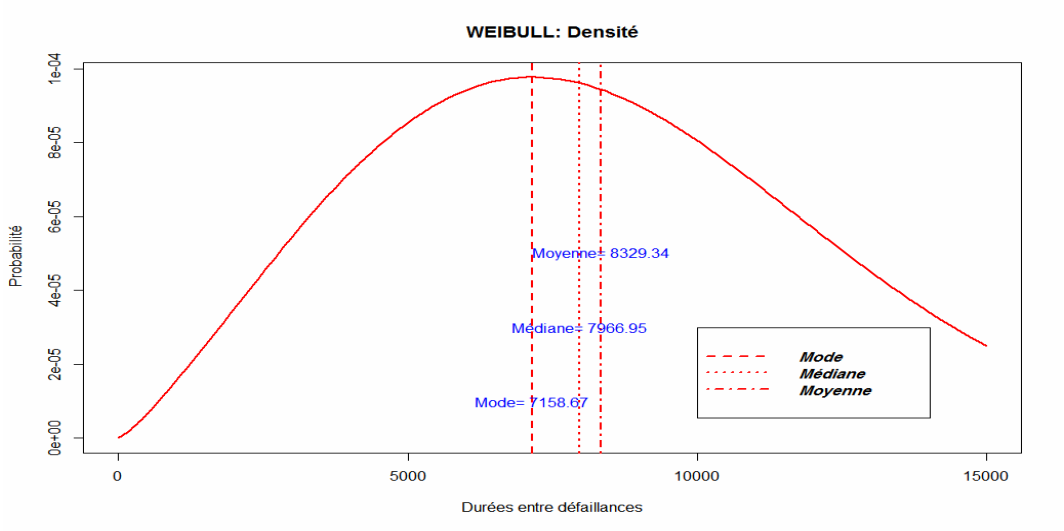


Figure III.23: Densité des données de turbine à gaz examinée

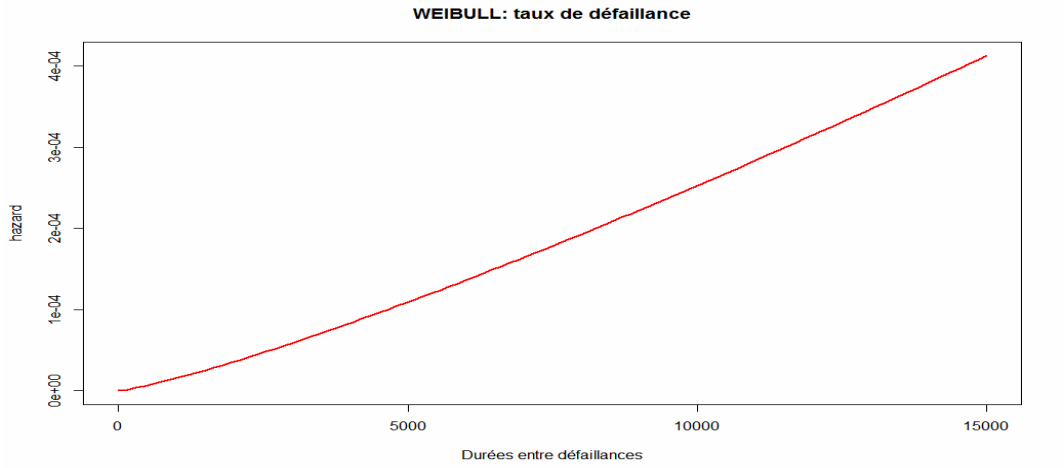


Figure III.24: Taux de défaillance des données de turbine à gaz examinée

	Statistiques	Valeurs
1	MTBF du système	MTBF =8329.339 h
2	La médiane de la distribution Weibull avec les Paramètres $\hat{\alpha} =$ 9404.91 et $\hat{\beta} = 2.208836$	médiane= 7966.949h
3	Le mode	Mode=7158.673h
4	La Moyenne (ou l'Esperance)	E(x)= MTBF =8329.339 h
5	l'écart-type du modèle	$\sigma = 3982.316$
6	Le coefficient de dissymétrie (skewness)	$\gamma_1 = 0.5037558$
7	Le coefficient d'aplatissement (kurtosis)	$\beta_2 = 3.033442$

Tableau III.10: Résultats statistiques obtenues

Distribution Weibull					
Kolmogorov-Smirnov					
Taille de l'échantillon Statistique Valeur de P	11 0,13674975 0,9689417				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	0,30829	0,35242	0,39122	0,4367	0,4677
Rejeter?	Non	Non	Non	Non	Non
Anderson-Darling					
Taille de l'échantillon Statistique	11 0,23889231				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	1,3749091	1,9286236	2,501756	3,2891966	3,9074159
Rejeter?	Non	Non	Non	Non	Non
Khi-Carré					
Degrés de liberté Statistique Valeur de P	1 0,24856529 0,61808712				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	1,6423744	2,7055435	3,8414588	5,4118944	6,6348966
Rejeter?	Non	Non	Non	Non	Non

Tableau III.11: Résultat de test d'ajustement

III.7. Weibull à trois paramètres

D'après les résultats obtenus, la fiabilité en utilisant le modèle de Weibull est satisfaisante pour le cas de turbine à gaz examinée. En effet, la distribution de Weibull a reçu beaucoup d'intérêt pour la théorie de fiabilité pour plusieurs applications industrielles dans la littérature [27, 76, 80 et 94]. Dans cette partie du travail, nous proposons une estimation des variables de fiabilité de la turbine à gaz examinée, en utilisant la distribution de Weibull à trois paramètres. Dans le but d'avoir un degré élevé de performance de système examiné. La Figure III.24, montre le modèle Weibull à trois paramètres appliquée au système de turbine à gaz examinée.

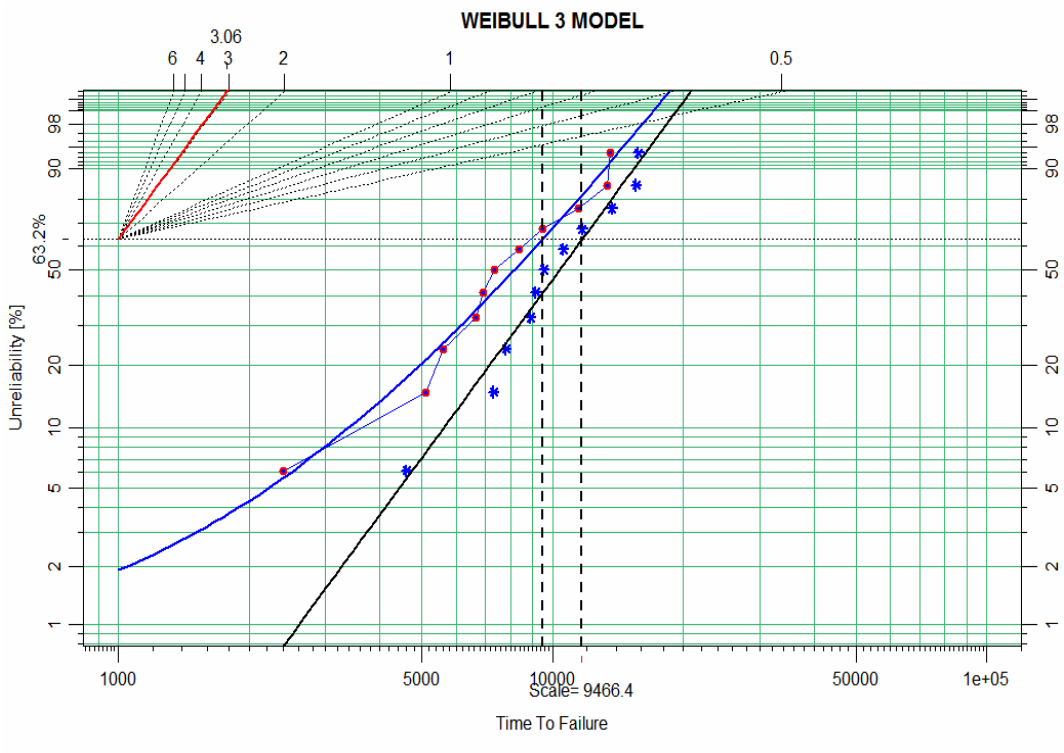


Figure III.25: Modèle Weibull à trois paramètres appliqués à une turbine à gaz examinée

Par conséquent, les performances de l'estimation de fiabilité basée sur Weibull à trois paramètres sont montrées sur la Figure III.25, qui présente la densité des données de fiabilité de la turbine à gaz examinée et la Figure III.26 montre la distribution cumulée avec Weibull à trois paramètres. La Figure III.27 présente le taux de défaillance avec Weibull à trois paramètres de turbine à gaz examinée et les résultats du test Kolmogorov Smirnov sont donnés dans le Tableau III.12.

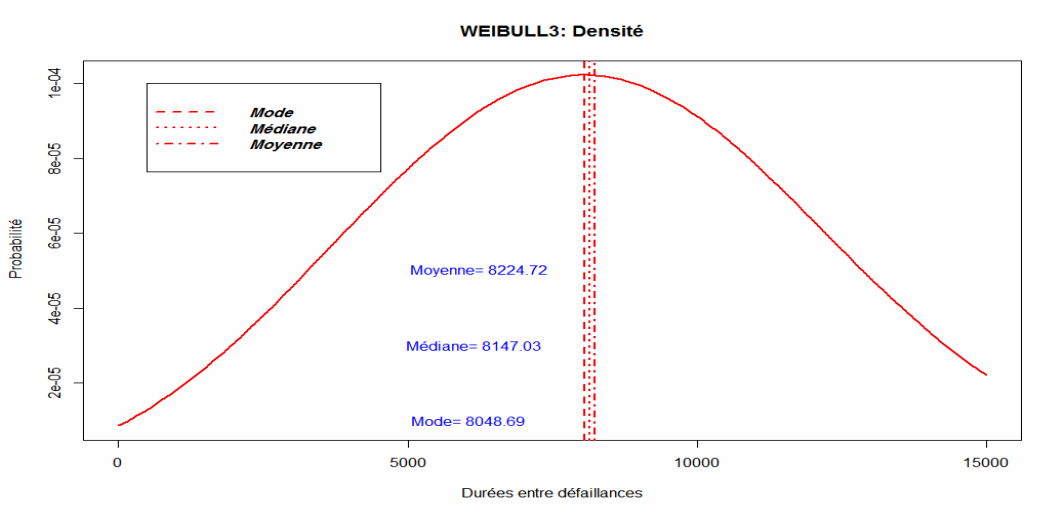


Figure III.26: Densité de données de fiabilité avec Weibull à trois paramètres de turbine

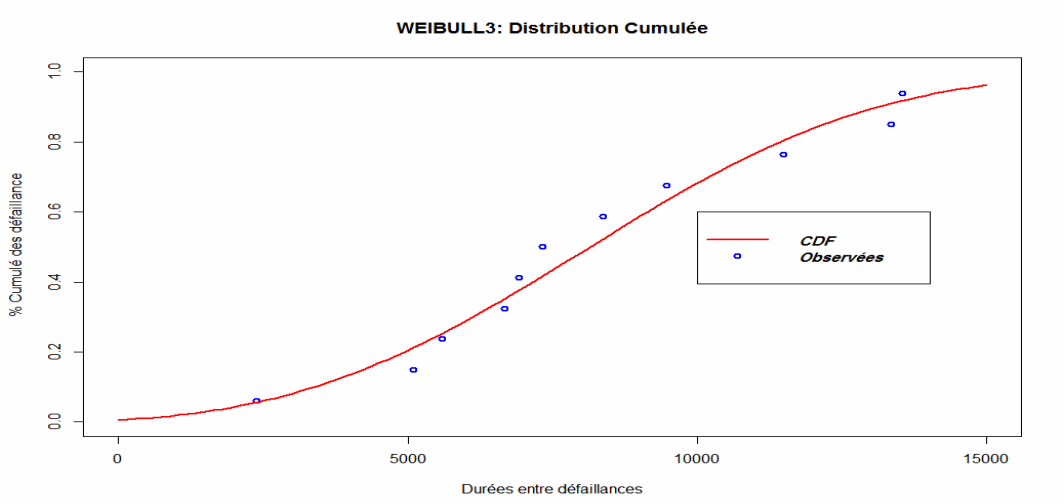


Figure III.27: Distribution cumulée avec Weibull à trois paramètres de turbine

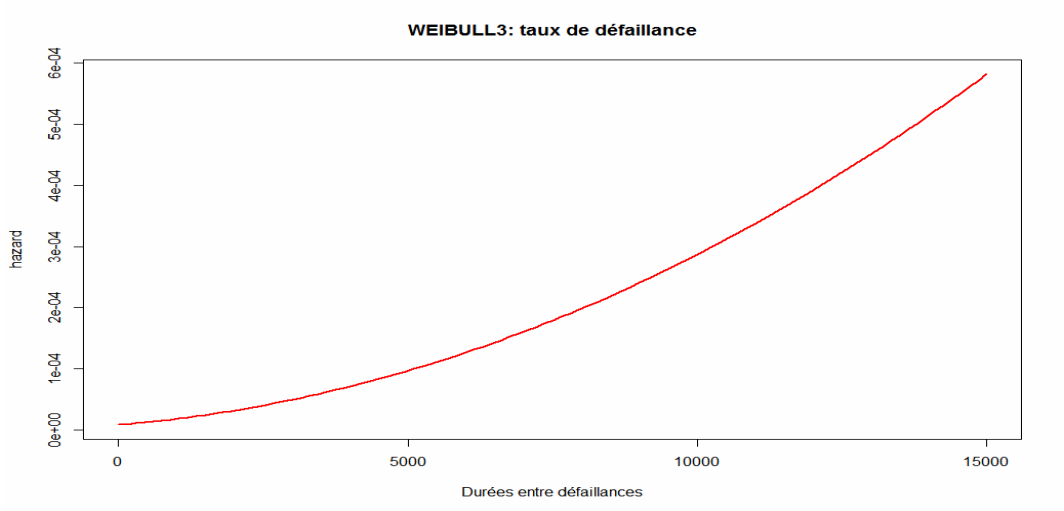


Figure III.28: Taux de défaillance avec Weibull à trois paramètres de turbine

Weibull (3P)					
Kolmogorov-Smirnov					
Taille de l'échantillon Statistique Valeur de P	11 0,12856452 0,98250439				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	0,30829	0,35242	0,39122	0,4367	0,4677
Rejeter?	**Non**	**Non**	**Non**	**Non**	**Non**
Anderson-Darling					
Taille de l'échantillon Statistique	11 0,23188296				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	1,3749091	1,9286236	2,501756	3,2891966	3,9074159
Rejeter?	**Non**	**Non**	**Non**	**Non**	**Non**
Khi-Carré					
Degrés de liberté Statistique Valeur de P	1 0,14941286 0,69909708				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	1,6423744	2,7055435	3,8414588	5,4118944	6,6348966
Rejeter?	**Non**	**Non**	**Non**	**Non**	**Non**

Tableau III.12: Résultat de test d'ajustement

II.11. Conclusion

Dans ce chapitre la modélisation des paramètres de fiabilité d'un système de turbine à gaz a été réalisée en utilisant les approches usuelles de fiabilité. Nous avons tous d'abord appliquée la loi exponentielle, dont la distribution est simple à utiliser, mais peu réaliste à cause de son taux de panne constant. Par la suite, nous avons utilisé la distribution normale, également connue sous le nom de la distribution gaussienne, qui peut représenter de sévères mécanismes d'usure en raison de la croissance rapide de sa fonction de risque donnée par son taux de défaillance. Pour remédier à l'inconvénient de loi normale dans la modélisation des données de fiabilité, la loi normale tronquée a été utilisée dans ce chapitre pour la détermination de paramètres de fiabilité de turbine à gaz examinée. Afin de tester les approches usuelles de fiabilité, la distribution Log Normale à été aussi exploré dans ce chapitre sur l'exemple de turbine à gaz. Finalement, les distributions de Weibull et Weibull à trois paramètres ont été appliqués à la turbine à gaz examinée dans ce travail. D'après les tests réalisés sur les différentes approches de fiabilité, nous confirmons que les résultats obtenus de la fiabilité sont des estimations plus précises et réalistes dans le cas examiné.

CHAPITRE IV

FIABILITE DE SYSTEME DE TURBINE A GAZ

Ce chapitre est destiné à présenté notre contribution pour un thème industriel important en intégrant des outils mathématiques basés sur la distribution hyperbolique et Weibull modifie pour déterminer des modèles de fiabilité robustes, appliqués à une turbine à gaz, à partir des bases des données et de l'historique d'exploitation, en appliquant les techniques de l'approche hyperbolique et Weibull modifie, afin de modéliser la fiabilité de cette machine tournante. Dans cette partie de travail de thèse, nous avons réalisé l'ajustement de l'approche proposée, basée sur une étude statistique des données réelles d'exploitation, par les calculs des estimations de fiabilité et des différentes densités de fiabilité et taux de défaillances de la machine examinée. En effet, dans l'industrie moderne, la fiabilité et la disponibilité fonctionnelle de l'équipement ont une influence essentielle sur la rentabilité des installations industrielles. A cet effet, nous avons développé un modèle de fiabilité performant basé sur l'approche hyperbolique et Weibull modifie, adaptée à un système de turbine à gaz. Afin d'assurer une disponibilité fonctionnelle du système examiné et assurer une fonction logistique permettant d'organiser et de réaliser toute une série de précautions pour éviter les défaillances imprévues.

IV.1. Introduction

La disponibilité de l'équipement industriel permet aux industries d'agir positivement sur la conformité de la production, l'exploitation des coûts et le succès de la compétitivité de la production. En effet, la durée de vie de gestion de l'équipement utilisés dans les installations de pétrole et de gaz est basée à la prise en compte des aspects du vieillissement, économique ainsi que les facteurs réglementaires afin d'optimiser le fonctionnement, l'entretien et les systèmes durée de vie au sein de leurs structures et composants, où l'objectif principal est de maintenir le niveau de sécurité et de disponibilité et de maximiser le retour sur l'investissement durant la durée de vie globale. La disponibilité des systèmes industriels est toujours essentielle et attirent beaucoup d'attention entre plusieurs recherches scientifiques et applications, en particulier pour les composants dont la défaillance peut causer des problèmes majeurs en termes de fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité [1, 8, 19, 29, 34 et 54].

Dans cette partie de travail de thèse, nous allons développer un modèle de fiabilité performant basé sur l'approche hyperbolique et Weibull modifie, adaptée à un système de turbine à gaz. Afin d'assurer une disponibilité fonctionnelle du système examiné et assurer une fonction logistique permettant d'organiser et de réaliser toute une série de précautions pour minimiser les défaillances imprévues. Un nouveau modèle basé sur la tangente hyperbolique est proposé d'être utilisé pour l'analyse et l'étude de la fonction de survie sur la modélisation de la fiabilité d'un système de turbine à gaz.

IV.2. Modèle à fonction tangente hyperbolique

Dans cette partie on propose une exploration d'un nouveau modèle qui contribuera à l'amélioration de la fiabilité des systèmes industriels. Il est évident que la fonction tangente hyperbolique a une courbe similaire à la fonction de répartition d'une distribution de probabilité, comme il est montré sur la Figure IV.1. Par conséquent, un nouveau modèle basé sur une fonction tangente hyperbolique définie sur R^+ peut être proposé [16]. Il est très clair que sa forme est similaire à la forme du modèle de Weibull.

Dans ce modèle, la fonction de survie sera étudiée en fonction de cela, c'est à dire par comparaison avec le modèle de Weibull.

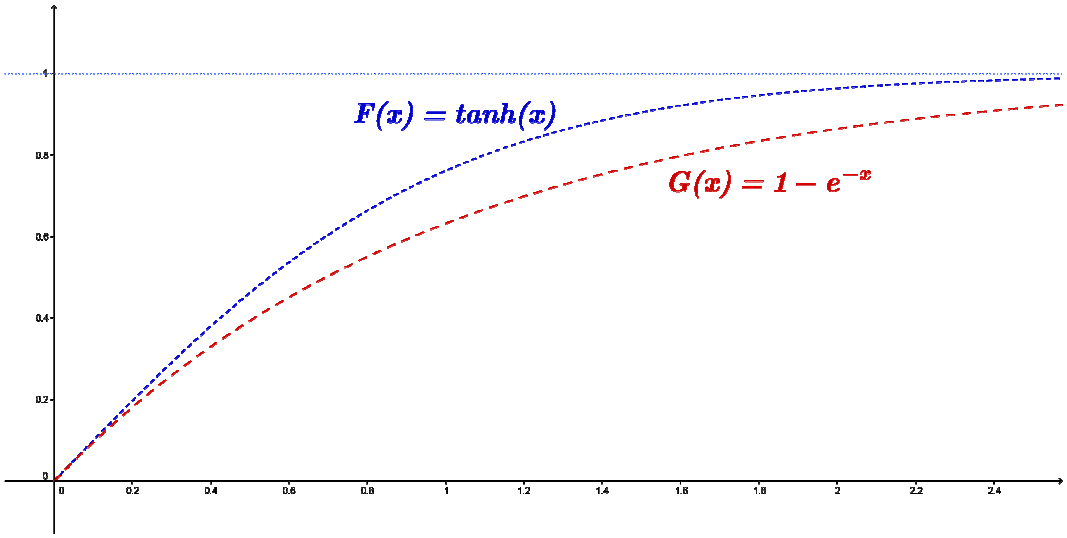


Figure IV.1: Forme de fonction tangente hyperbolique sur $\Re^+$

Pour l'étude de ce modèle proposé, une application pratique a été faite avec des données réelles data. Ces données ont été recueillies à partir de l'historique d'une turbine à gaz fonctionnant dans un système de transport de gaz naturel qui est utilisé dans le sud de l'Algérie [68]. L'approche de la fiabilité développée dans cette partie permet la modélisation des effets des dommages pour prédire la performance de l'opération de la turbine à gaz examiné et donner des résultats comparable en termes de validité par rapport à l'approche Weibull.

IV.2.1. Fonction de répartition du modèle

Comme il est mentionné dans le paragraphe précédent, un nouveau modèle basé sur la fonction tangente hyperbolique est proposé pour être utilisé dans l'analyse et l'étude de la fonction de survie dans la modélisation de la fiabilité. La fonction tangente hyperbolique considérée dans cette partie est définie comme étant une fonction sur R^+, comme il est montré sur la Figure IV.1, elle est exprimée comme suit:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ \tanh(x) & x \geq 0 \end{cases} \qquad \text{(IV.1)}$$

Pour évaluer l'impact des effets du vieillissement sur l'équipement par la fréquence annuelle et pour identifier les équipements sensibles et les stratégies requises par priorité de service afin de gérer les risques qui sont associés à l'âge des installations, une fonction de distribution cumulative est utilisée.

La limite de $F(x)$ est égal à 1 lorsque x tend vers l'infini positif et est égal à 0 lorsque x tend vers 0. La fonction proposée est une fonction non décroissante et continue à droite, de sorte que la fonction tangente hyperbolique proposée remplit les exigences d'une distribution et elle présente un bon choix de fonction de distribution cumulative candidate.

En résumé, La fonction de répartition pour une variable aléatoire X, désigné par $F(x)$ est la probabilité que X prend une valeur inférieure ou égale à x, donnée par:

$$F(x) = P(X \leq x) \tag{IV.2}$$

La fonction de répartition a les propriétés suivantes:

- $0 \leq F(x) \leq 1$ pour touts les valeurs de x,
- $\lim_{x \to -\infty} F(x) = 0$,
- $\lim_{x \to +\infty} F(x) = 1$,
- $F(x)$ est une fonction non décroissante de x.

Ces propriétés sont vérifiées par la fonction tangente hyperbolique proposée. La forme de la fonction de distribution de durée de vie à base de la fonction tangente hyperbolique proposée est déduite de la fonction de distribution de Weibull. La fonction de survie est présentée comme suit :

$$S(t) = 1 - \tanh\left((\lambda.t)^{\beta}\right) \tag{IV.3}$$

Où β est le paramètre de forme et λ est le paramètre d'échelle.

La fonction de distribution cumulative est exprimée de la manière suivante :

$$F(t) = 1 - S(t) = \tanh\left((\lambda.t)^{\beta}\right) \tag{IV.4}$$

Sur la base de la dérivée de la dernière fonction, la fonction de densité de probabilité est obtenue comme suit :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{(\lambda.t)^{\beta-1}\lambda.\beta}{\cosh^2\left((\lambda.t)^{\beta}\right)} \tag{IV.5}$$

Cette fonction peut avoir différentes formes suivant la valeur de β, comme il est montré sur la Figure IV.1.

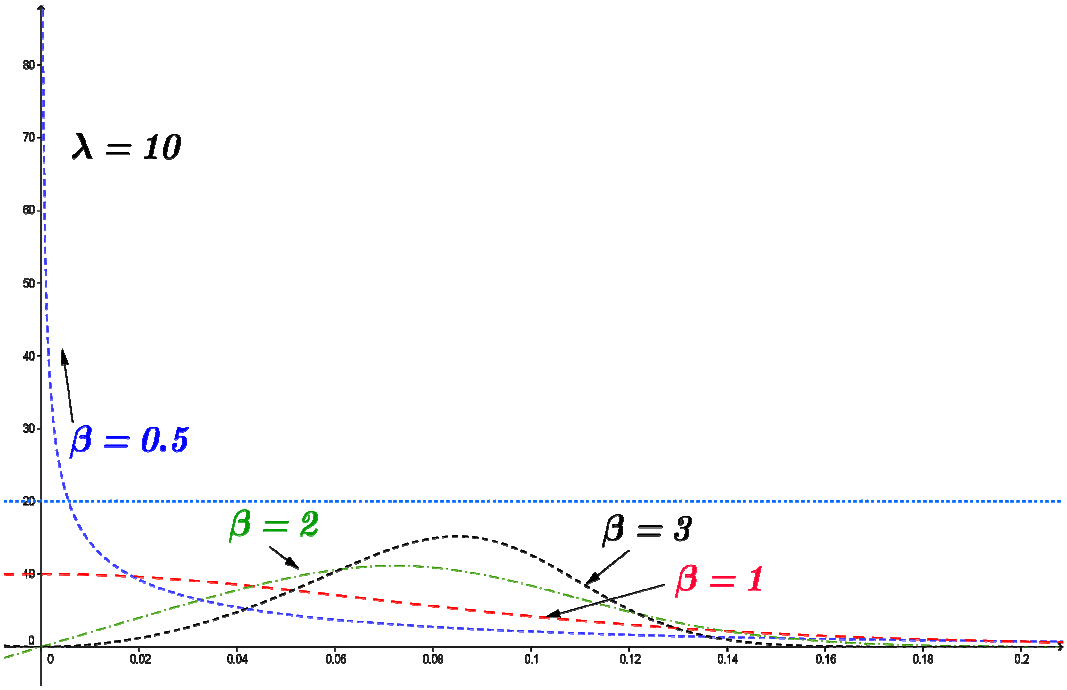


Figure IV.2: Fonction de densité

La fonction de risque est déterminée par les équations suivantes :

$$P_r\left(t \prec T \le t+\Delta t \middle| T \succ t\right) = \frac{f(t)}{R(t)}\Delta t = h(t)\Delta t \qquad \text{(IV.6)}$$

Avec:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{(\lambda.t)^{\beta-1} \cdot \dfrac{\lambda.\beta}{\cosh^2\left((\lambda.t)^{\beta}\right)}}{1-\tanh\left((\lambda.t)^{\beta}\right)} \qquad \text{(IV.7)}$$

La fonction hasard $h(t)$ peut être réécrite en utilisant la fonction exponentielle comme suit:

$$h(t) = \frac{2.\lambda.\beta(\lambda.t)^{\beta-1}}{\left(1+e^{-2.(\lambda.t)^{\beta}}\right)} \qquad \text{(IV.8)}$$

IV.2.2. Fonction de risque et fonction de densité

La fonction de risque du modèle tangente hyperbolique proposé est exprimée par l'équation (3.8) et est représenté sur la Figure IV.2, il est évident que la forme de la courbe de cette fonction dépend uniquement du paramètre β. Par conséquent, la courbe de cette fonction doit être discuté en se basant sur la valeur de β, montré sur la Figure IV.3.

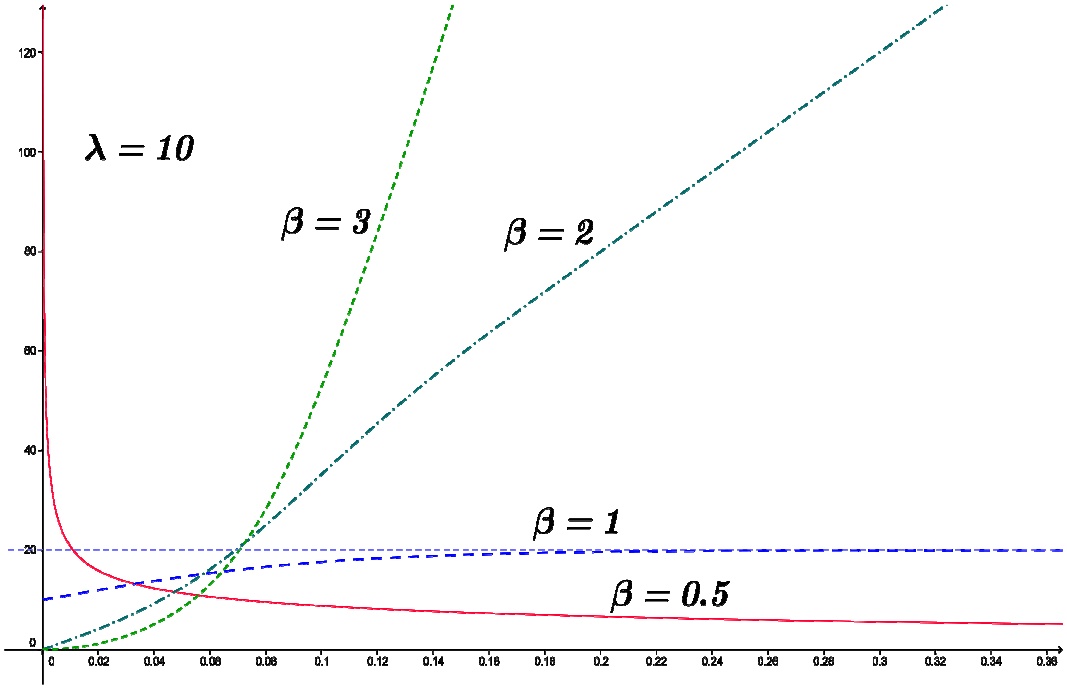


Figure IV.3: Fonction de risque

1. Dans le cas où $\beta = 1$

La fonction de risque tend rapidement vers 2λ, on a:

$$\lim_{t\to\infty} h(t) = 2.\lambda \tag{IV.9}$$

Car

$$\lim_{t\to\infty}\left(1 + e^{-2.(\lambda.t)^1}\right) = 1 \tag{IV.10}$$

2. Dans le cas où $\beta = 2$**,**

La fonction de risque devient:

$$h(t) = \frac{4.t.(\lambda)^2}{\left(1 + e^{-2.(\lambda.t)^2}\right)} \xrightarrow{tend} 4.t.(\lambda)^2 \tag{IV.11}$$

La fonction de risque est une ligne droite avec une pente égale à $4.(\lambda)^2$.

3. Dans le cas où $0 < \beta < 1$

La fonction de risque devient:

$$h(t) \xrightarrow{tend} 2.\lambda.\beta(\lambda.t)^{\beta-1} \quad \text{(IV.12)}$$

La forme de la fonction de risque suit la forme de $(t)^p$ avec $-1 < p < 0$.

4. Dans le cas où $\beta > 2$

La forme de la fonction de risque suit la forme de $(t)^p$ avec $p > 1$ (forme convexe).

5. Dans le cas où $1 < \beta < 2$

La forme de la fonction de risque suit la forme de $(t)^p$ avec $p > 1$ (forme concave).

On peut conclure que les formes de cette fonction de risque sont équivalentes à celles de la fonction de risque de Weibull. La fonction de densité du modèle tangente hyperbolique proposé donnée dans l'équation (IV.4), pour plusieurs valeurs de β nous donne plusieurs formes de la fonction de densité, comme il est représenté sur la Figure IV.2.

IV.3. Application du modèle tangente hyperbolique sur une turbine à gaz

Afin de mieux faire les comparaisons entre ce modèle est les autres utilisées dans le chapitre précédent, on utilise les mêmes données de fiabilité. Une méthode graphique d'estimation des paramètres a été adaptée pour ce modèle.

IV.3.1. Estimation des paramètres

L'objectif doit être la linéarisation de la fonction de répartition du modèle (IV.4). Pour cela on commence par l'utilisation de fonction inverse de la fonction tangente hyperbolique au deux cotés de l'équation (IV.4) :

$$y_i = \overline{F}(t_i) = 1 - S(t_i) = \tanh\left((\lambda.t_i)^{\beta}\right) \quad \text{(IV.13)}$$

Avec:

$$\tanh^{-1}(y_i) = (\lambda.t_i)^{\beta} \quad \text{(IV.14)}$$

Où $t_1 < t_2 < \ldots < t_N$ sont les données de fiabilité de la turbine et les y_i sont les rangs médians correspondants.

La fonction $\overline{F}(t_i)$ est de la distribution empirique du modèle, ses valeurs sont obtenus a partir de la formule (IV.15), puisque le nombre total $N = 11 \prec 20$.

$$y_i = \frac{i - 0.3}{N + 0.4} \tag{IV.15}$$

A partir de (IV.14) et avec $\tanh^{-1}(y_i) = \frac{1}{2}\log\left(\frac{1+y_i}{1-y_i}\right)$, on obtient :

$$\frac{1}{2}\log\left(\frac{1+y_i}{1-y_i}\right) = (\lambda.t_i)^{\beta} \tag{IV.16}$$

L'application du logarithme au deux cotés de l'équation (IV.16) donne:

$$\log\left[\frac{1}{2}\log\left(\frac{1+y_i}{1-y_i}\right)\right] = \log(\lambda.t_i)^{\beta} \tag{IV.17}$$

$$\log\left[\frac{1}{2}\log\left(\frac{1+y_i}{1-y_i}\right)\right] = \beta\log(\lambda) + \beta\log(t_i) \tag{IV.18}$$

C'est la forme linéaire voulue $\Rightarrow Y_i = A + BX_i$, avec:

$$Y_i = \log\left[\frac{1}{2}\log\left(\frac{1+y_i}{1-y_i}\right)\right] \tag{IV.19}$$

$$X_i = \log(t_i) \tag{IV.20}$$

$$A = \beta.\log(\lambda) \text{ et } B = \beta \tag{IV.21}$$

Le papier de probabilité doit donc être basé sur les deux équations (IV.19) et (IV.20). La détermination des paramètres estimés suit les étapes suivantes :

1. Tractage des t_i (TBF_i) en fonction des rangs médians correspondants,
2. Tractage de la droite d'ajustement des points $\Rightarrow Y = A + BX$,
3. $\hat{\lambda} = 1/Scale$ où $Scale$ est l'abscisse du point de la droite d'ajustement correspondant à l'ordonné 76% (quantile 76.16%).

Si $t = Scale = 1/\lambda$ alors de $y = \tanh\left((\lambda.t)^{\beta}\right)$ on a $y = \tanh\left((\lambda.Scale)^{\beta}\right)$, $y = \tanh\left((\lambda./\lambda)^{\beta}\right)$

Alors $y = \tanh(1) \Rightarrow y = 0.7615942$.

De la Figure IV.4, on peut lire directement la valeur de $Scale = 11029h$ et on déduit $\hat{\lambda} = 1/Scale = 9.067021\text{e-}05$

1. Le deuxième paramètre est le paramètre de forme $\hat{\beta}$ qui représente la pente de la droite d'ajustement. sa valeur peut être lue directement sur l'axe supérieur du graph (papier de probabilité) ou être calculé directement de l'équation de la droite en prenant n'importe quel point de la droite d'ajustement $\hat{\beta} = 1.94$,
2. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau IV.1.

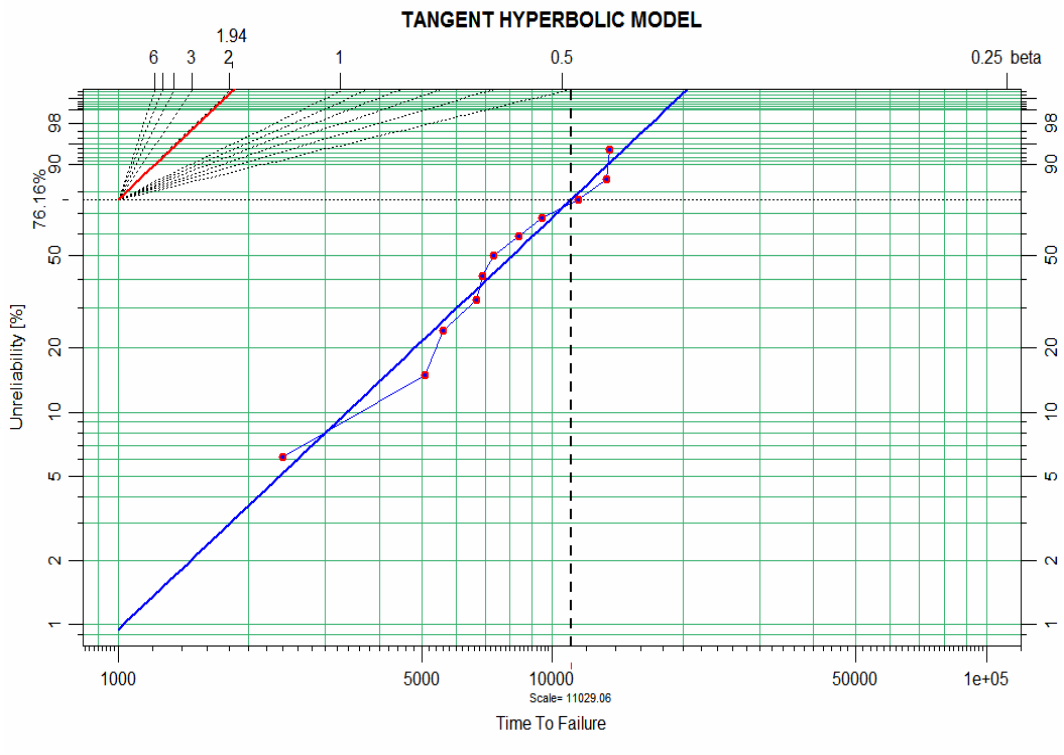


Figure IV.4: Traçage de probabilité cumulé

Paramètres	$\hat{\beta}$	$\hat{\lambda} = 1/Scale$
Valeurs estimées	1.93959	9.066956e-05=1/11029

Tableau IV.1: Paramètre estimés

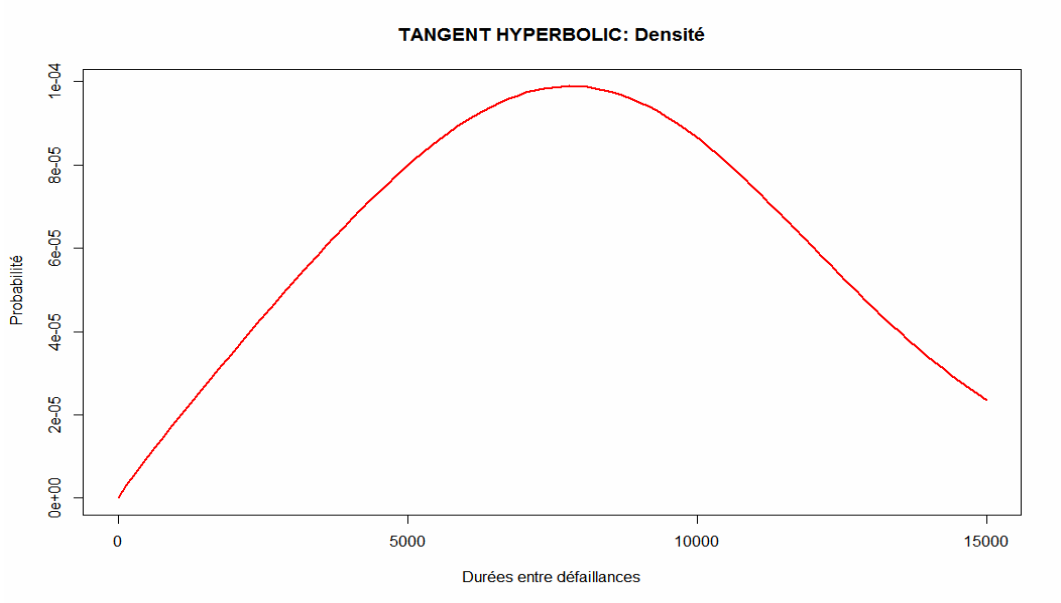


Figure IV.5: Tracé de la fonction de densité

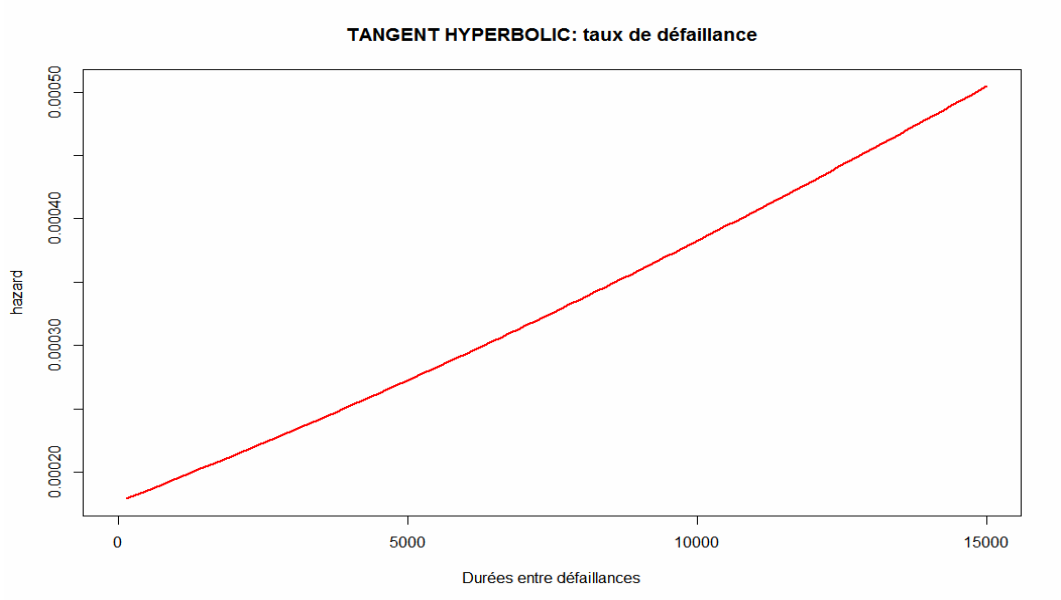


Figure IV.6: Tracé de la fonction de risque

L'utilisation des méthodes d'estimations numériques telles que la méthode de Moindres carrés non linéaires donne généralement de meilleurs résultats que les méthodes graphiques, comme il est montré sur la Figure IV.8.

Les résultats obtenus sont comparées avec les résultats obtenus par les modèles de Weibull à deux et trois paramètres et ils sont résumés dans les graphes de la Figure IV.9. et le Tableau IV.2.

Erreurs	T-HYPERBOLIC	WEIBULL-2P	WEIBULL-3P
RMSE	0.0460482	0.04451112	0.04749413
MSE	0.002120437	0.001981239	0.002255692

Tableau IV.2: RMSE et MSE des trois modèles

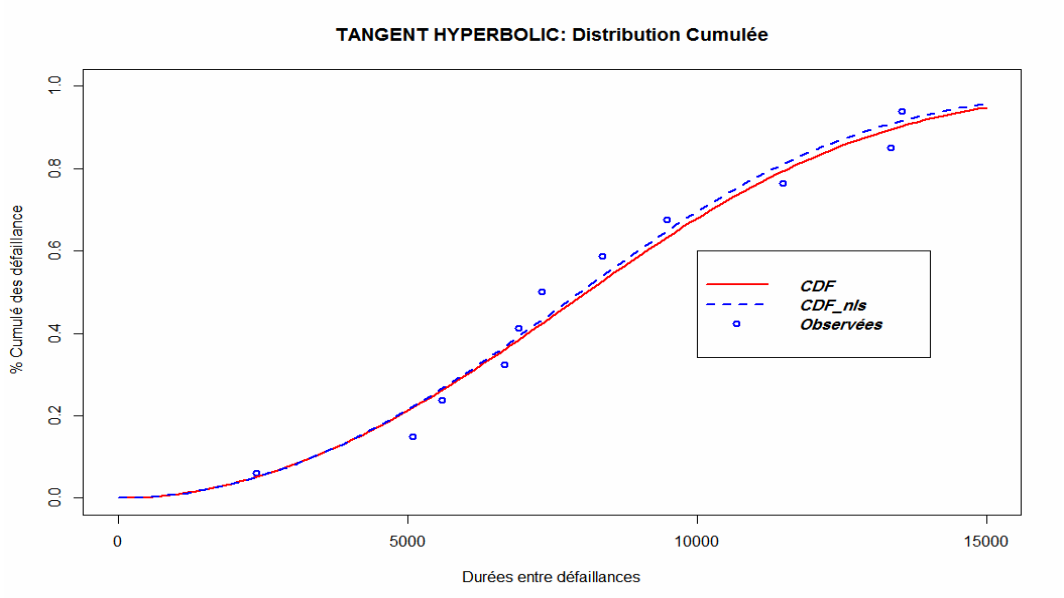


Figure IV.7.A: Comparaison d'estimation de la fonction de répartition entre la méthode graphique et la méthode des Moindres carrés non linéaires

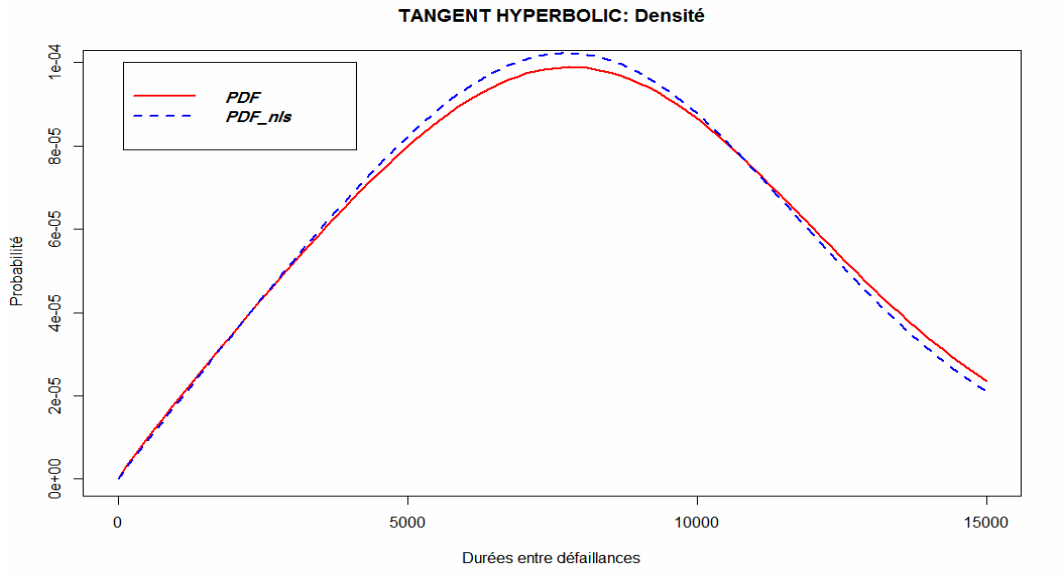


Figure IV.7.B: Comparaison d'estimation de la densité entre la méthode graphique et la méthode des Moindres carrés non linéaires

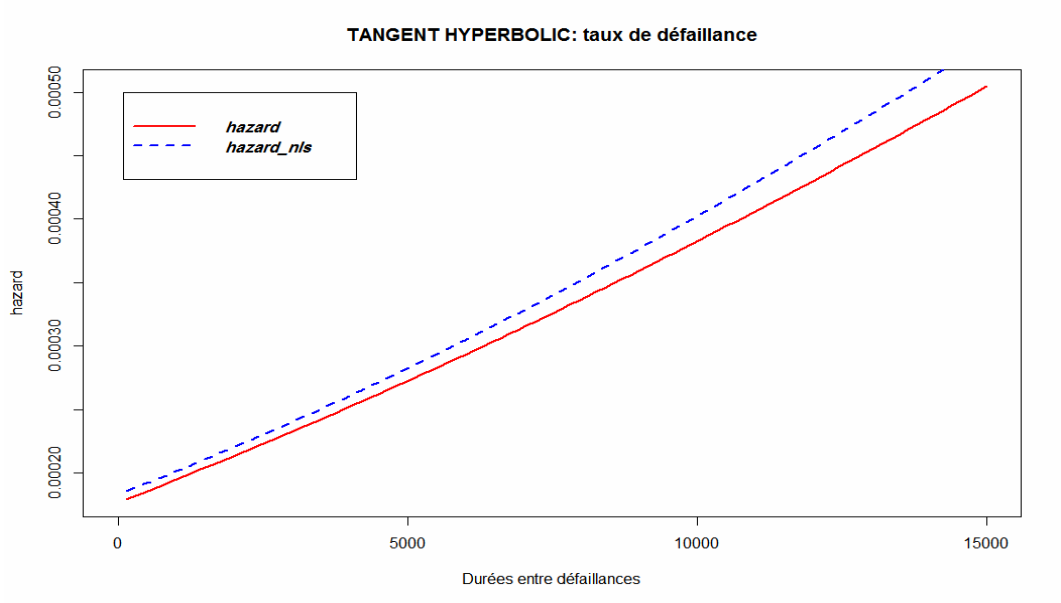
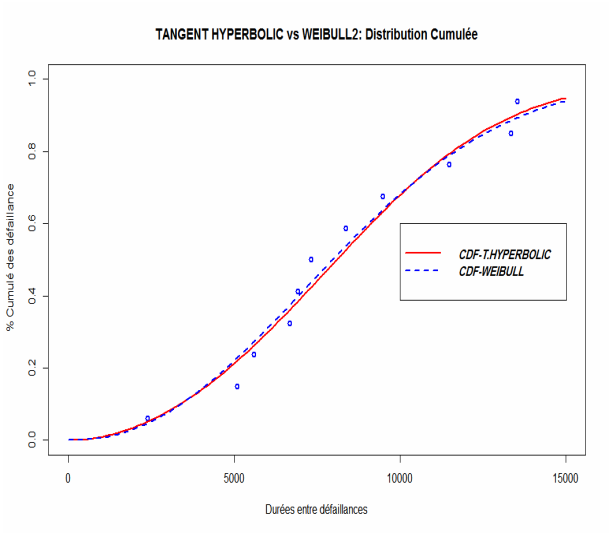


Figure IV.7.C: Comparaison d'estimation de taux de défaillance entre la méthode graphique et la méthode des Moindres carrés non linéaires

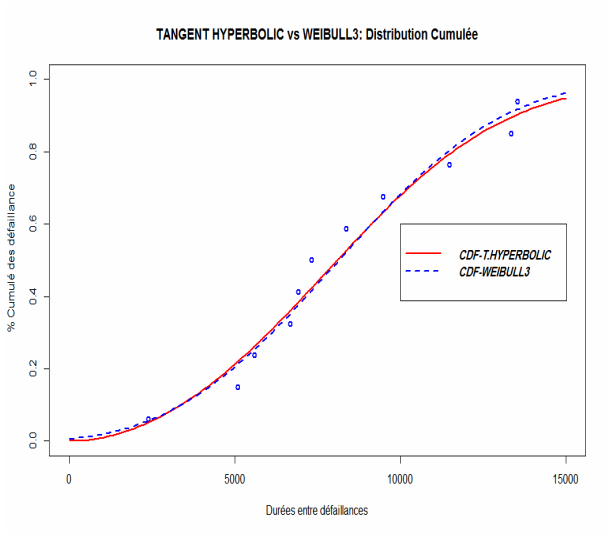
Il est évident que, pour obtenir une meilleure gestion des performances des installations, il est nécessaire d'améliorer la performance de fiabilité. Considérant que, avec l'application de la méthode proposée sur la base de la fonction tangente hyperbolique et en appliquant la méthode des moindres carré pour l'estimation des paramètres de bons résultats peuvent être obtenus.

L'objectif principal est d'analyser et de mesurer les paramètres de fiabilité du système étudié, afin de déterminer le meilleur moment pour prendre des mesures de maintenance basée sur l'analyse de la fiabilité et de prendre les bonnes décisions. L'approche de la fiabilité développée dans cette partie a permis d'avoir des résultats comparables à ceux de Weibull. Ce modèle peut être amélioré pour avoir une forme de la courbe de la fonction de risque en forme de baignoire.

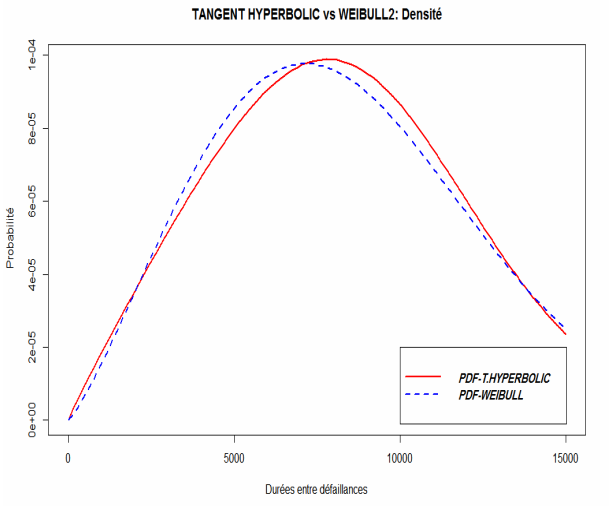
D'autres résultats de comparaison du modèle à tangente hyperbolique et les deux modèles de Weibull (à deux et à trois paramètres) ont été réalisés. Comme il est montré sur la Figure 8 (A, A1, B, B1, C et C1).



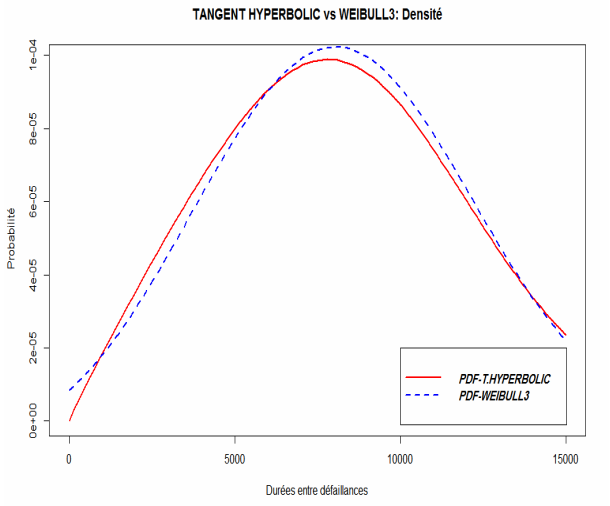
(a)



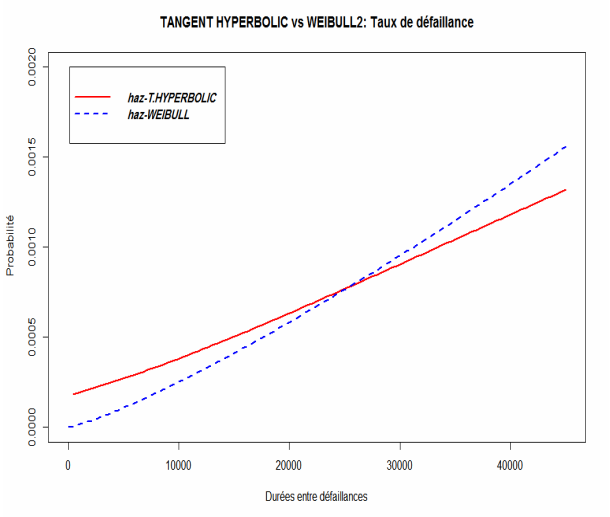
(a1)



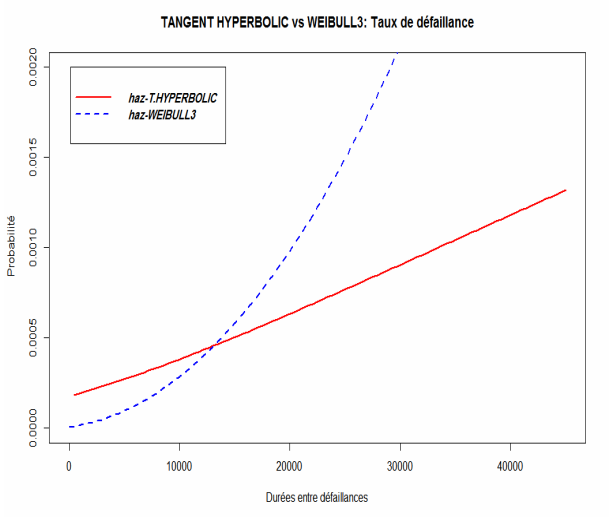
(b)



(b1)



(c)



(c1)

Figure IV.8: Graphes comparatifs entre le modèle à base de la fonction tangente hyperbolique et Weibull deux et trois paramètres

IV.3.2. Calcul du MTBF

Dans l'analyse de fiabilité, le MTBF est le temps moyen entre les défaillances d'un système réparable.

$$MTBF = \int_0^{+\infty} tf(t)dt = \int_0^{+\infty} t \frac{(\lambda.t)^{\beta-1}\lambda.\beta}{\cosh^2\left((\lambda.t)^{\beta}\right)} dt \quad \text{(IV.22)}$$

Il est à noter qu'il existe une autre façon pour le calcul de la valeur attendue [50], à savoir :

$$MTBF = \int_0^{+\infty} S(t)dt = \int_0^{+\infty} 1 - \tanh\left((\lambda.t)^{\beta}\right)dt \quad \text{(IV.23)}$$

Modèles	Weibull model	Hyperbolic function model
MTBF	8329.339 h	8318.381 h

Tableau IV.3: Valeurs des MTBF calculés

IV.4. Modèle à fonction du taux défaillance en forme de baignoire

Plusieurs modèles de fiabilité ayant une fonction du taux de défaillance en forme de baignoire sont présents dans la littérature [40, 41, 69, 87, 101, 108]. La fonction de taux de défaillance est une caractéristique importante des distributions de durée de vie. Elle est aussi appelé la fonction de risque et elle mesure le risque d'évènement d'une défaillance d'un objet à un moment précis t.

Pour avoir une fonction de risque en forme de baignoire, il faut que le dispositif ait trois périodes de vie, une vie précoce (ou infantile) les défaillances où la fonction de risque diminue avec le temps; la vie utile où la fonction de risque est à peu près constante. Enfin, la vie d'usure où la fonction de risque croit avec le temps.

Ces trois périodes sont reliées au paramètre de forme β dans le modèle Weibull [91, 100], comme il est montré sur la Figure IV. 9. Pour $\beta < 1$ cela correspond a la période de la vie infantile, $\beta \approx 1$ correspond a la période de la vie utile et enfin $\beta > 1$ correspond à la période d'usure du dispositif.

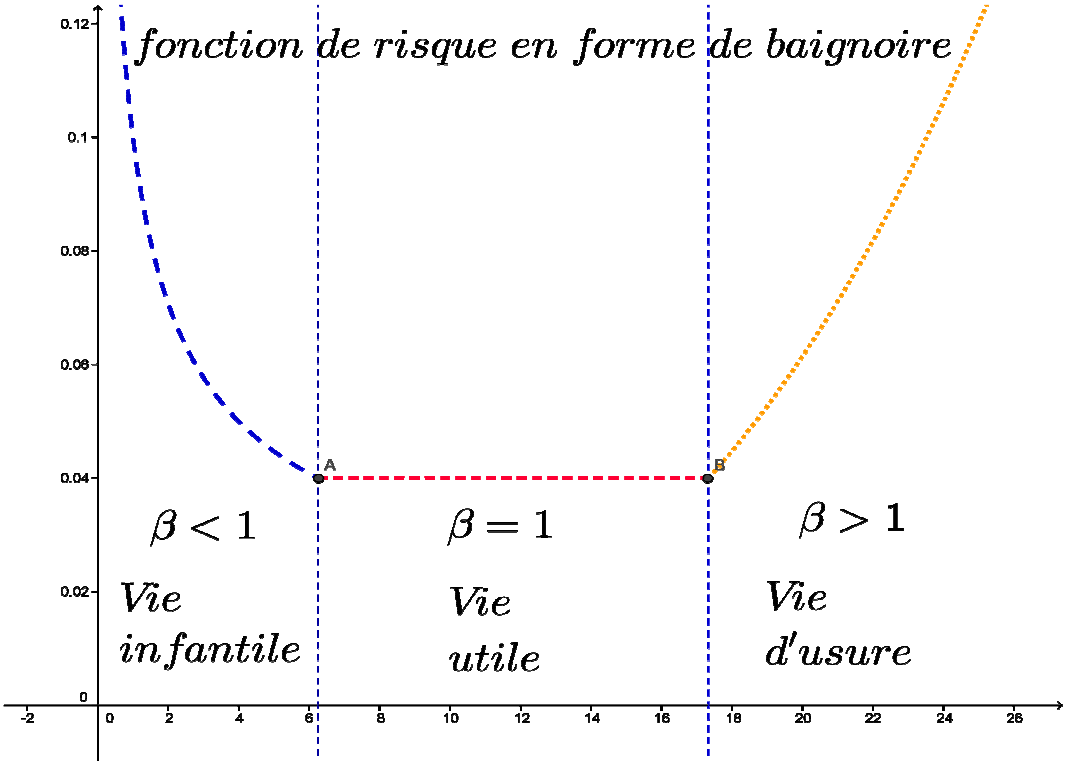


Figure IV.9: Relation entre le paramètre de forme β et la fonction de risque en forme baignoire

Cela signifie, qu'on peut avoir un modèle de fiabilité avec une fonction de risque en forme de baignoire. En utilisant le modèle de Weibull, β doit être remplacé par une fonction mathématique qui décroît au cours de la première période de vie, rester à peu près constant à proximité de "1" pendant la période de vie utile et enfin croit à nouveau pendant la période de vie d'usure.

Dans cette partie, un nouveau modèle de fiabilité est présenté basé sur le modèle Weibull où son paramètre de forme β est remplacé par une fonction mathématique connue proposée par Farazdaghi et Harris (1968) [9] pour décrire la relation de la densité de rendement de différentes cultures.

$$\beta(x) = \frac{1}{a + b(x/c)^d} \qquad \text{(IV.24)}$$

Cette fonction peut être utilisée pour modéliser le paramètre de forme du modèle de Weibull comme il est montré sur la Figure IV.10.

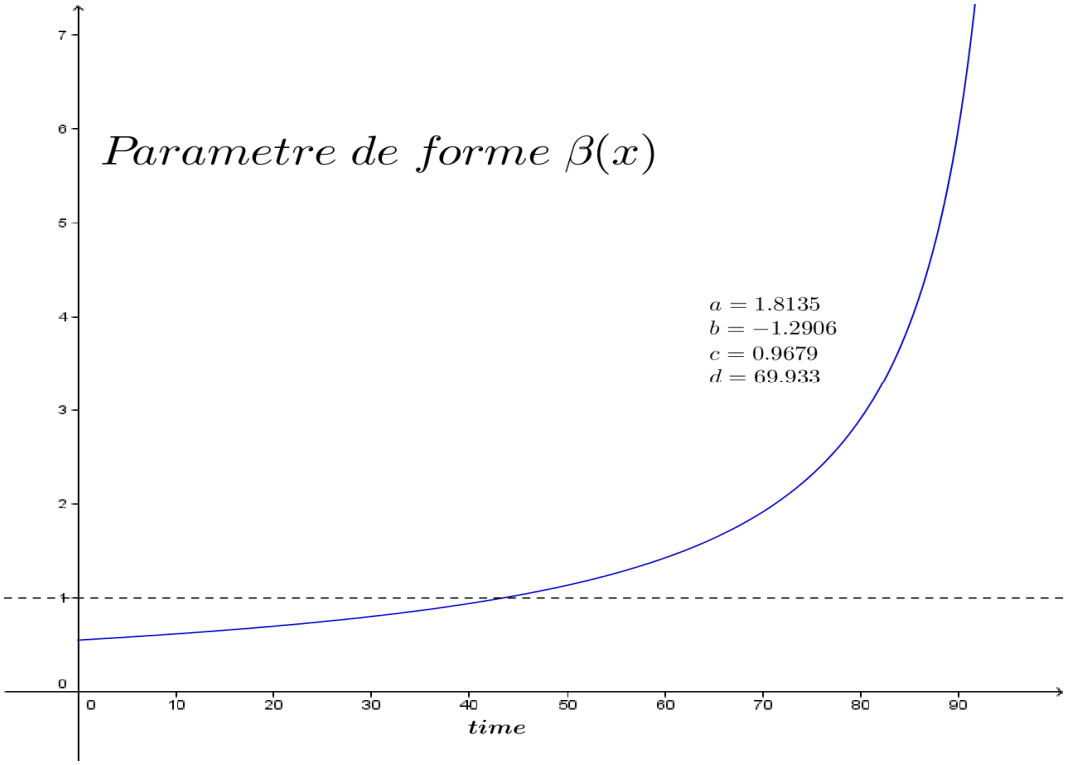


Figure IV.10: Variation du paramètre de forme $\beta(t)$

IV.5. Modèle de Weibull modifié proposé

Le modèle proposé est le modèle Weibull avec un paramètre de forme variable. Le paramètre de forme est, alors, une fonction du temps qui croit progressivement pour atteindre "1" pendant la période de vie précoce, entame ensuite une croissance accéléré pendant la période de vie d'usure, comme il est montré sur la Figure IV.10. La fonction de densité du modèle proposé est alors:

$$f(t) = \left(\frac{t}{d}\right)^{\beta(t)} e^{-\left(\frac{t}{d}\right)^{\beta(t)}} \left(\log(\frac{t}{d})(\beta'(t)) + \frac{\beta(t)}{t}\right) \qquad \text{(IV.25)}$$

Où $\beta(t)$ et le paramètre de forme variable et d représente le paramètre d'échelle de la distribution.

Cette fonction représente une famille de densités, à condition que $\beta(t)$ vérifie les exigences citées dans le paragraphe précédent. Et la fonction de répartition du modèle est la suivante:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{d}\right)^{\beta(t)}} \qquad \text{(IV.26)}$$

Dans ce cas et avec l'utilisation de Farazdaghi et Harris [35] (IV.24) le modèle devient :

$$f(t) = \left(\frac{t}{d}\right)^{\frac{1}{a+b(t/d)^c}} e^{-\left(\frac{t}{d}\right)^{\frac{1}{a+b(t/d)^c}}} \left(\frac{1}{t\left(a + b\left(\frac{t}{d}\right)^c\right)} - \frac{bc\left(\frac{t}{d}\right)^c \log\left(\frac{t}{d}\right)}{t\left(a + b\left(\frac{t}{d}\right)^c\right)^2} \right) \quad \text{(IV.27)}$$

Avec :

$$\beta(t) = \frac{1}{a + b(t/d)^c} \quad \text{(IV.28)}$$

$$\beta'(t) = -\frac{bc\left(\frac{t}{d}\right)^c}{t\left(a + b\left(\frac{t}{d}\right)^c\right)^2} \quad \text{(IV.29)}$$

La fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{d}\right)^{\left(\frac{1}{a+b(t/d)^c}\right)}} \quad \text{(IV.30)}$$

La fonction de survie est :

$$S(t) = e^{-\left(\frac{t}{d}\right)^{\left(\frac{1}{a+b(t/d)^c}\right)}} \quad \text{(IV.31)}$$

Et finalement la fonction de risque et donnée par :

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)}$$

$$h(t) = \left(\frac{t}{d}\right)^{\frac{1}{a+b(t/d)^c}} \frac{1}{t\left(a + b\left(\frac{t}{d}\right)^c\right)} \left(1 - \frac{bc\left(\frac{t}{d}\right)^c \log\left(\frac{t}{d}\right)}{\left(a + b\left(\frac{t}{d}\right)^c\right)}\right) \quad \text{(IV.32)}$$

IV.5.1. Traçage de probabilité

De l'équation (IV.29) on peut écrire

$$F(t_i) = 1 - e^{-\left(\frac{t_i}{d}\right)^{\left(\frac{1}{a+b(t_i/d)^c}\right)}}$$
$$1 - F(t_i) = e^{-\left(\frac{t_i}{d}\right)^{\beta(t_i)}} \quad \text{(IV.33)}$$

$$Y_i = \ln(-\ln(1-F(t_i))) = \beta(t_i)\left[\ln(t_i) - \ln(d)\right]$$
$$Y_i = \beta(t_i)\left[X_i - \ln(d)\right] \quad \text{(IV.34)}$$

IV.5.2. Détermination des paramètres

De la Figure IV.11, et l'équation (IV.34) on peut observer qu'il y a trois zones qui peuvent être considérées compte tenu de la variation de $\beta(t_i)$, ou plus exactement, $\beta(e^{X_i})$ dans le papier de probabilité, comme il est montré sur la Figure IV.11.

1. **Zone I:** Dans cette zone le paramètre de forme $\beta(e^{X_i})$ est pratiquement constant. L'équation (IV.34) peut être réécrite de la façon suivante.

$$Y_i = \beta_0\left[X_i - \ln(d)\right] \quad \text{(IV.35)}$$

Où β_0 est une valeur constante et pour laquelle le modèle est réduit en modèle très connus (Weibull à deux paramétrés).

$$R(t) = \frac{\beta_0}{d}\left(\frac{t}{d}\right)^{\beta_0 - 1} e^{-\left(\frac{t}{d}\right)^{\beta_0}} \quad \text{(IV.36)}$$

β_0 est donc la pente de la droite d'ajustement dans cette zone.

$$\lim_{t \to 0} \beta(t) = \frac{1}{a} = \beta_0$$
$$\Rightarrow \quad a = \frac{1}{\beta_0} \quad \text{(IV.37)}$$

2. **Zone II:** dans cette zone le paramètre de forme $\beta(e^{X_i})$ varie progressivement autour de l'unité. Le second paramètre qui peut être déduit en utilisant cette zone est d, en posant $Y = 0$ l'équation suivante peut être résolue :

$$Y_i = \beta(t_i)\left[X_i - \ln(d)\right] = 0 \quad \text{(IV.38)}$$

$$\left[X - \ln(d)\right] = 0 \quad \text{(IV.39)}$$

$$X_{Y=0} = \ln(d) \Rightarrow d = e^{X_{Y=0}} \qquad \text{(IV.40)}$$

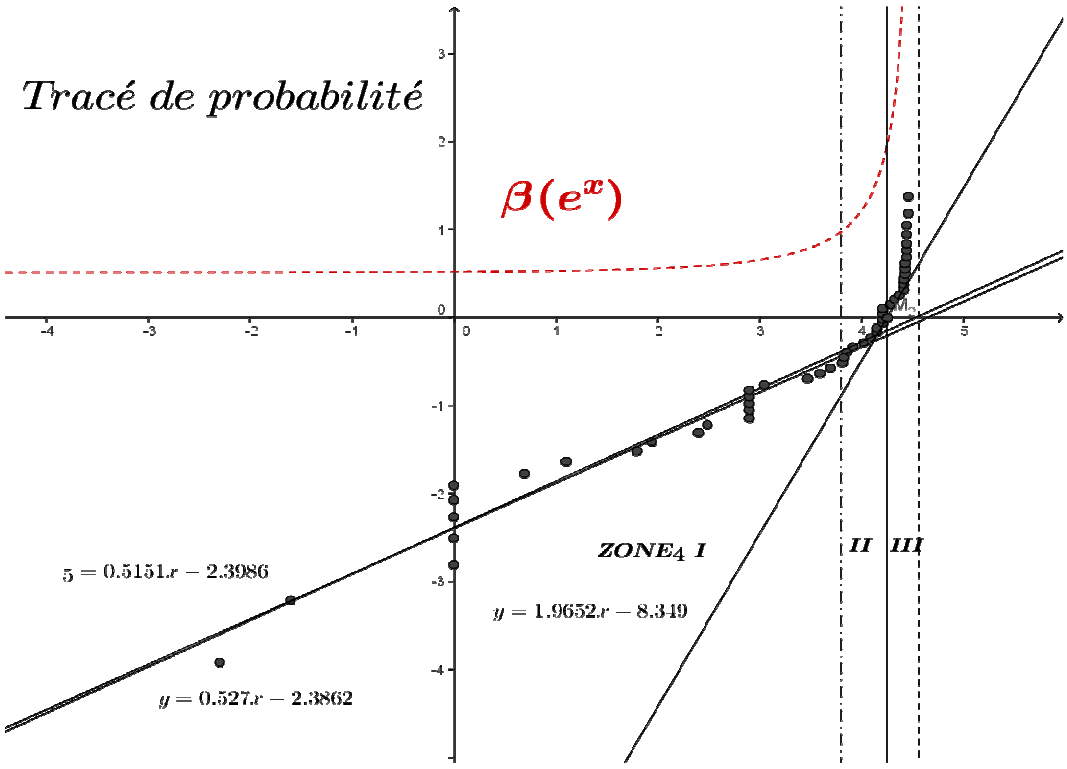


Figure IV.11: Tracé de la probabilité

Où $X_{Y=0}$ est l'abscisse de l'intersection de la courbe d'ajustement avec l'axe des X, en traçant la tangente en ce point on peut déterminer la valeur $\beta_{Y=0}$ donnée par la formule suivante:

$$\beta_{Y=0} = \frac{1}{a + b\left(\frac{d}{d}\right)^c} = \frac{1}{a+b} \qquad \text{(IV.41)}$$

Connaissant la valeur a en calcul la valeur de b, donnée par:

$$b = \frac{1 - a\beta_{Y=0}}{\beta_{Y=0}} \qquad \text{(IV.42)}$$

3. **Zone III:** dans cette zone le paramètre de forme $\beta(e^{X_i})$ croit rapidement vers l'infini.

   $\beta(t) \rightarrow \infty$ Quand le dénominateur de $\beta(t) \rightarrow 0$

$$\Rightarrow a + b\left(\frac{t}{d}\right)^{c} = 0 \tag{IV.43}$$

$$\left(\frac{t}{d}\right)^{c} = \frac{-a}{b} \tag{IV.44}$$

$$c = \frac{\ln\left(\frac{-a}{b}\right)}{\ln\left(\frac{t_{\lim it}}{d}\right)} \tag{IV.45}$$

$$t_{\lim it} = e^{X\,\lim ite} \tag{IV.46}$$

Ou $X_{\lim it}$ peut être approximé par la fin de cette zone.

L'approximation $X_{\lim it}$ n'est pas toujours facile à faire, une deuxième façon de déterminer le paramètre c a partir de la premier zone est possible. En utilisant une droite d'ajustement des points au voisinage de zéro on peut déduire la valeur de $\beta_{x=0}$ qui est la pente de cette droite. En ce point : $x = 0$ d'une part

Et d'autre part

$$\beta(e^{x})_{x=0} = \beta(1) = \frac{1}{a + bd^{-c}} \tag{IV.47}$$

$$\Rightarrow c = \frac{\ln\left[-\frac{b\beta_{x=0}}{a\beta_{x=0} - 1}\right]}{\ln(d)} \tag{IV.48}$$

IV.5.3. Application numérique

IV.5.3.1. Les données

Le tableau Tab1 contient les temps de défaillance de 50 éléments donnés par Aarset [1, 101] ; le tracé TTT indique une forme en baignoire de la fonction de risque, comme il est montré sur la Figure IV.12 [91, 101].

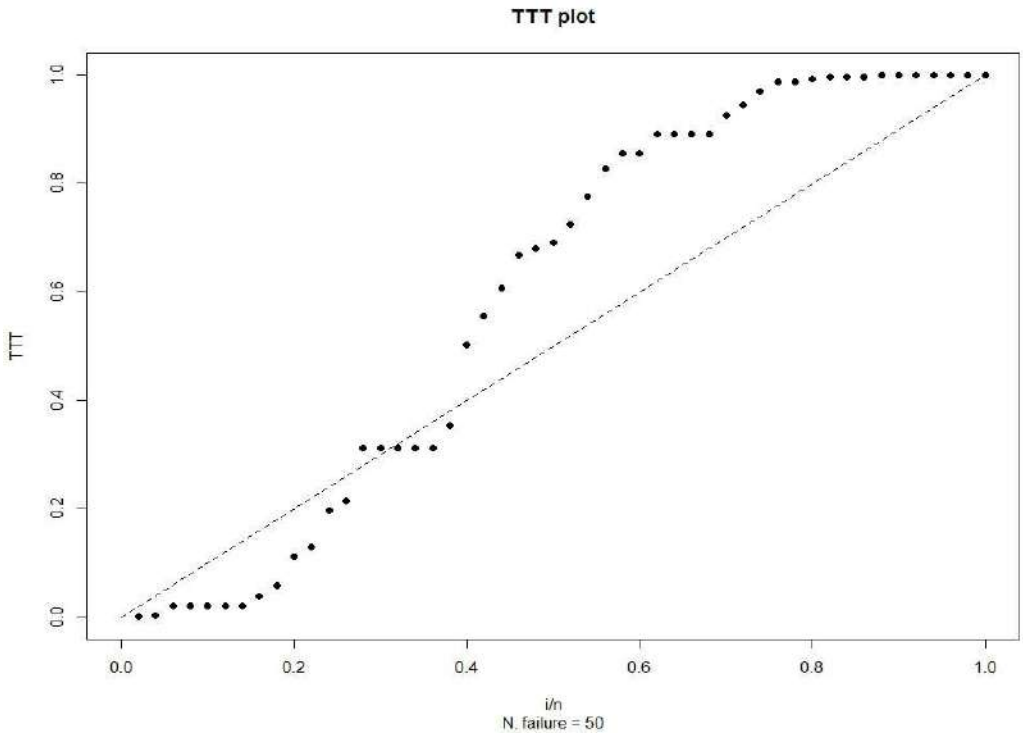


Figure IV.12: Tracé TTT des temps de défaillance de 50 éléments

0.1	0.2	1	1	1	1	1	2	3	6	7	11	12
18	18	18	18	18	21	32	36	40	45	46	47	50
55	60	63	63	67	67	67	67	72	75	79	82	82
83	84	84	84	85	85	85	85	85	86	86		

Tableau IV.4: Temps de défaillance de 50 éléments [101]

IV.5.3.2. Détermination graphique des paramètres

De l'équation de la droite d'ajustement dans la zone I, montré sur la Figure IV.11, on a:

$$y = 0.5151x - 2.3976 \tag{IV.49}$$

$$\beta_0 = 0.5151 \tag{IV.50}$$

De l'équation (IV.37) , on trouve :

$$a = \frac{1}{\beta_0} = \frac{1}{0.5151} = 1.941 \tag{IV.51}$$

De la Figure IV.11, l'intersection de la courbe d'ajustement avec l'axe des X on peut prélever la valeur de $X_{Y=0} = 4.2485$ et en utilisant l'équation (IV.40) la valeur du paramètre d peut être calculée comme suite:

$$d = e^{X_{Y=0}} = 70 \tag{IV.52}$$

On trace la tangente de la courbe d'ajustement au point $y = 0$ pour estimer la valeur de $\beta_{Y=0}$, donnée par:

$$y = 1.9652x - 8.349 \tag{IV.53}$$

Avec $\beta_{Y=0} = 1.9658$ et en utilisant l'équation (IV.42) on calcule la valeur estimée du paramètre b, qui sera déterminé par la relation suivante:

$$b = \frac{1 - a\beta_{Y=0}}{\beta_{Y=0}} = -1.4376 \tag{IV.54}$$

Finalement de l'ajustement au voisinage de l'axe des Y on obtient l'équation de la droite d'ajustement $y = 0.527x - 2.3862 \Rightarrow \beta_{x=0}$=0.527 et de l'équation (IV.48) on calcule $c = 0.8206$. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.5.

$\hat{a}$	$\hat{b}$	$\hat{c}$	$\hat{d}$
1.941	-1.4376	0.8206	70

Tableau IV.5: Valeurs estimées des paramètres

La détermination des paramètres graphiquement n'est pas facile, car il n'est pas évident de tracer convenablement la tangente de la courbe d'ajustement au point $x = 0$ pour déterminer le paramètre b (estimation de $\beta_{Y=0}$).

En plus, une légère variation de la valeur du paramètre c entraîne un mauvais ajustement des points de fiabilité. Néanmoins, même si les valeurs estimées des paramètres seront plus au moins erronées. Ils sont toujours utiles pour servir comme valeurs initiales pour les méthodes d'estimation numériques.

Ce modèle a très bien modélisé ces données de fiabilité qui comporte les trois phases de vie d'un élément.

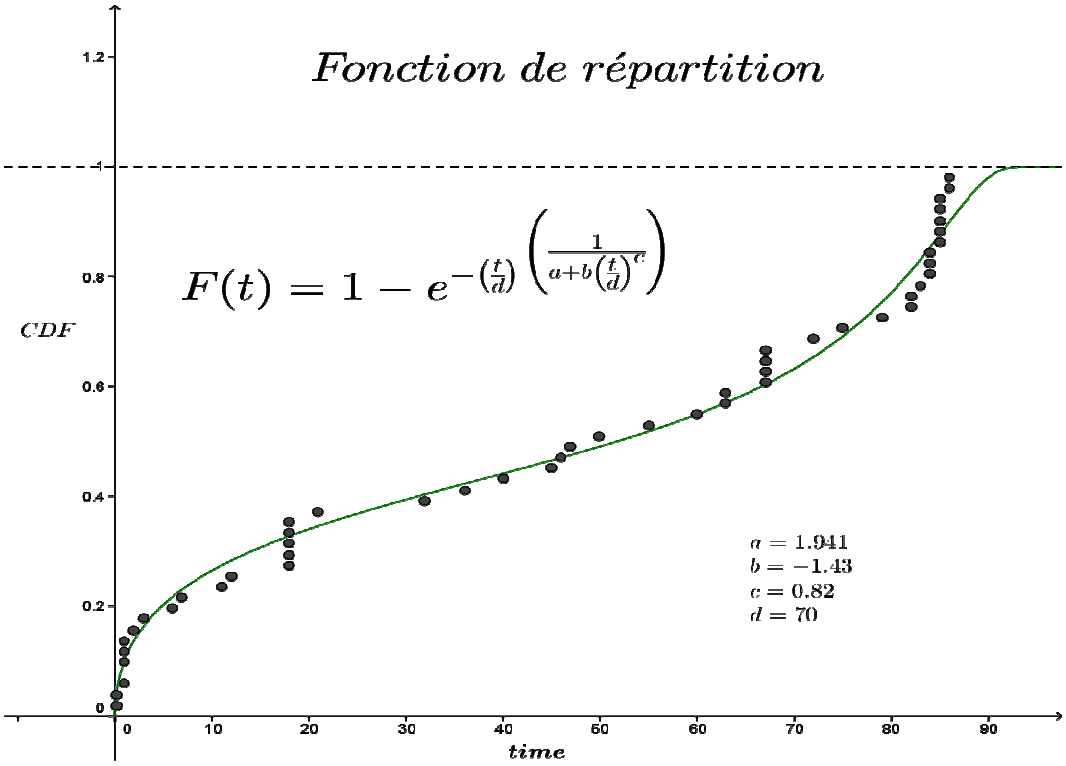


Figure IV.13: Tracé de la fonction de répartition des temps de défaillance de 50 éléments

De la Figure IV.13, on constate clairement que les points sont très bien ajustés par le modèle. De la Figure IV.14, la fonction de risque suit une forme de baignoire, les trois zones de vie sont clairement discernables la zone des pannes précoce est plus étroite par rapport au autres zone (vie utile et vie d'usure).

Le choix de ses données a permit de bien tester ce modèle sur toutes les phases de vie possibles.

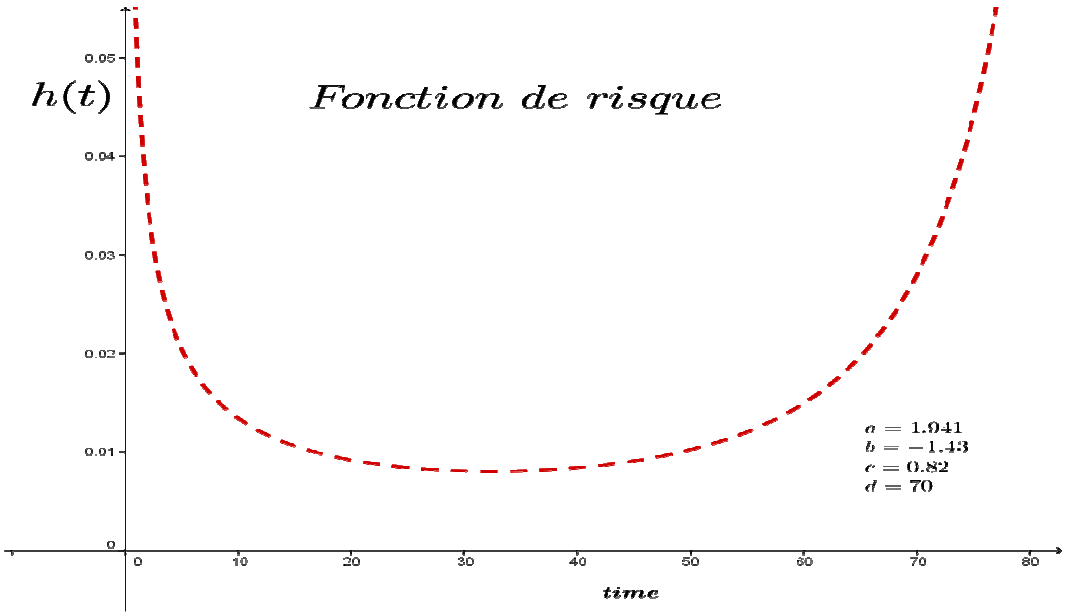


Figure IV.14: Tracé de la fonction de risque des temps de défaillance de 50 éléments

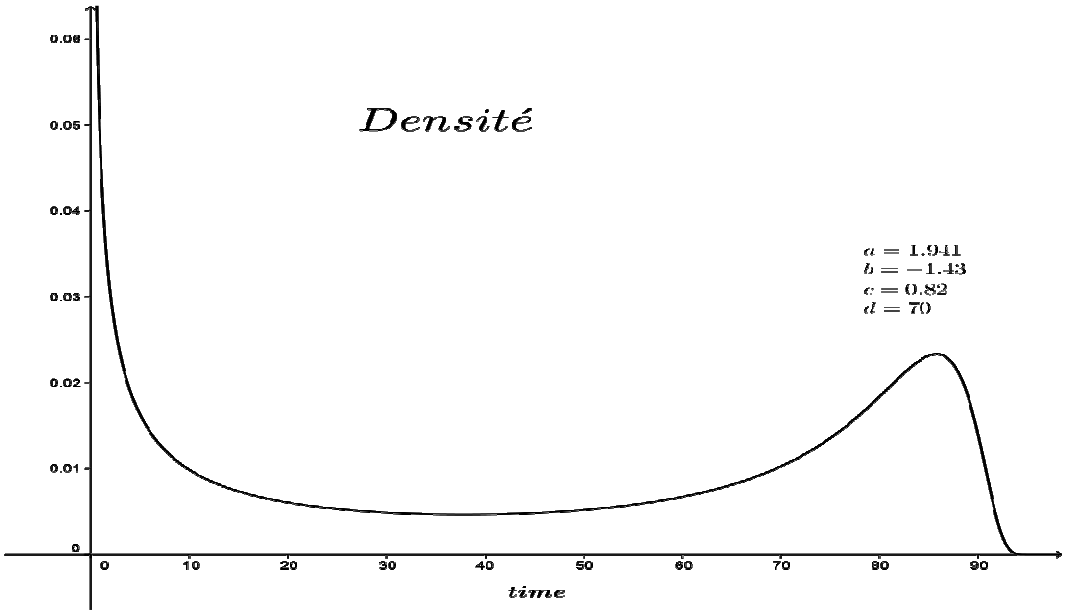


Figure IV.15: Tracé de la fonction de densité des temps de défaillance de 50 éléments

IV.6. Application du modèle de Weibull modifié proposé à une turbine à gaz

IV.6.1. Détermination des paramètres

D'après le graphe TTT des données de la turbine, on ne constate qu'une seul phase de vie là où le taux de défaillance est croissant. Le modèle ajuste très bien ces données, mais la méthode graphique doit être suivie différemment. Puisque tous les points sont sur une même droite d'ajustement il est difficile d'estimer graphiquement les valeurs des paramètres car le paramètre c a une très petite valeur ce qui ramène le modèle au modèle de Weibull avec $\beta = \frac{1}{a+b}$ qui donne $\beta = 2.2211$.

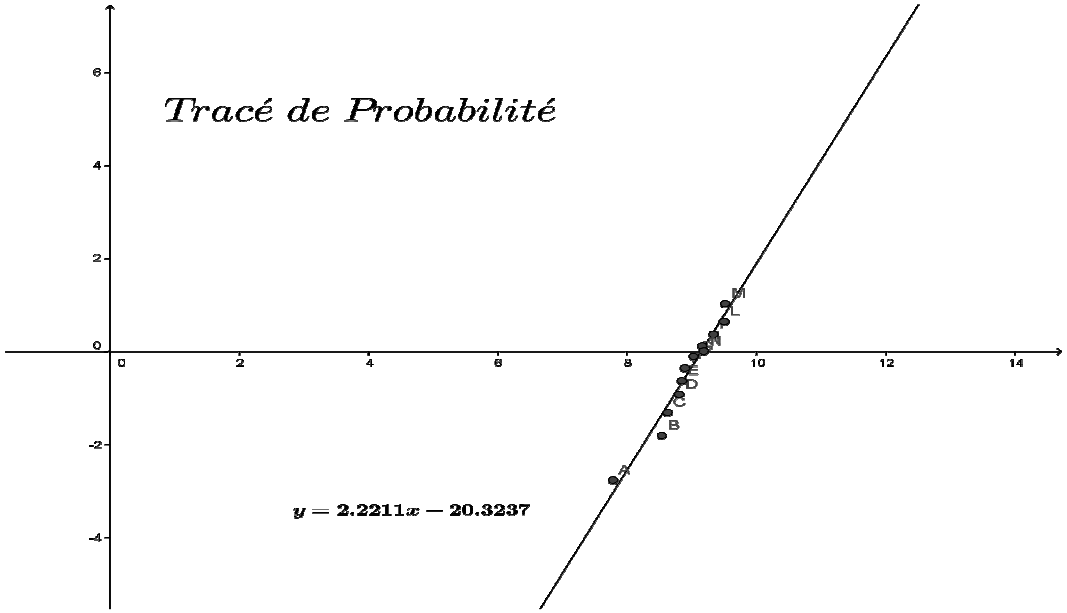


Figure IV.16: Tracé de probabilité des temps de défaillance de la turbine

$\hat{a}$	$\hat{b}$	$\hat{c}$	$\hat{d}$
97,07815	-96,68099	1,2182E-4	9308,12568

Tableau IV.5: Valeurs estimées des paramètres

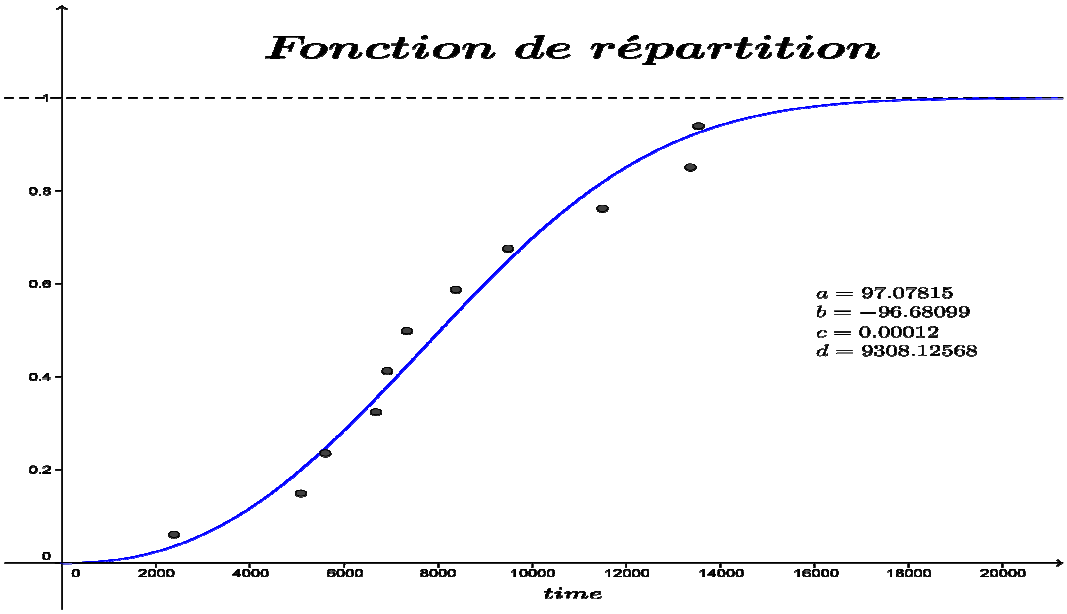


Figure IV.17: Tracé de la fonction de répartition des temps de défaillance de la turbine

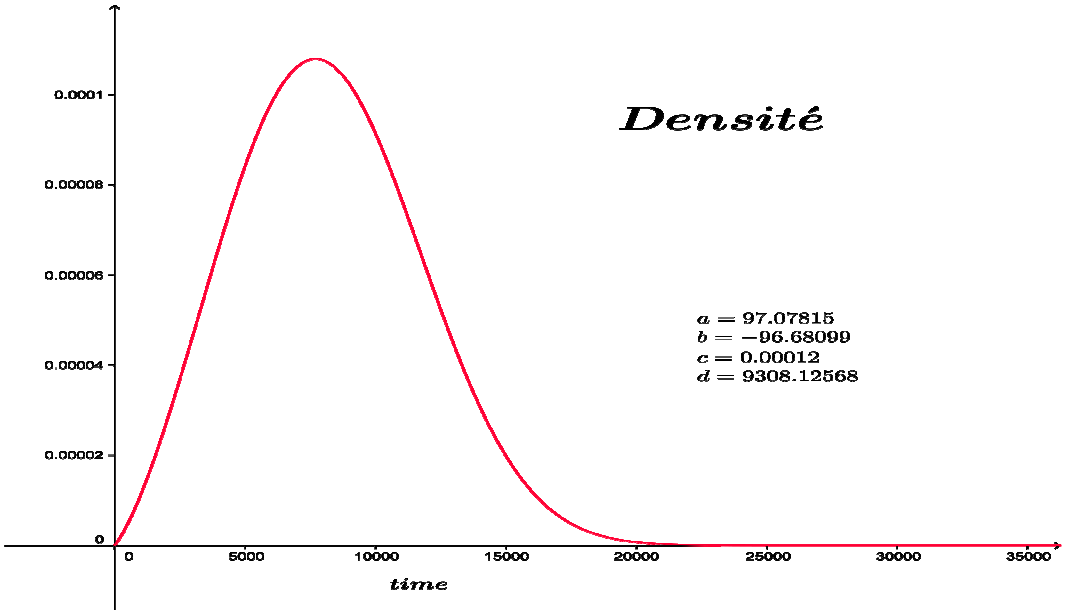


Figure IV.18: Tracé de la densité des temps de défaillance de la turbine

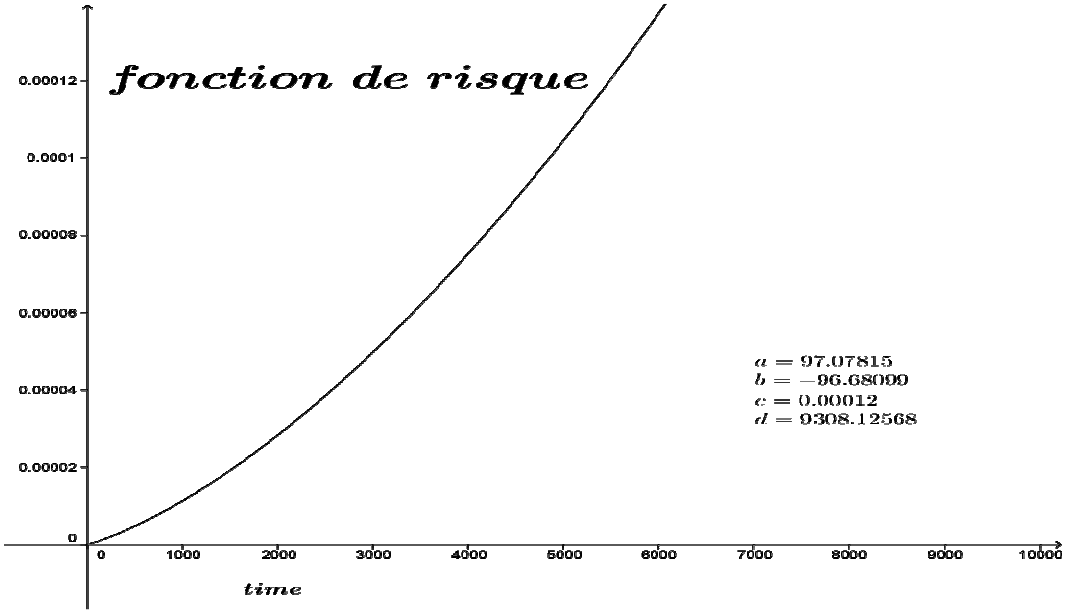


Figure IV.19: Tracé de la fonction de risque des temps de défaillance de la turbine

Les données de fiabilité de la turbine ne montrent pas une présence des pannes précoces. Cela est confirmé par le tracé de la fonction de risque de la turbine à l'aide du modèle présenté. La méthode graphique d'estimation des paramètres de ce modèle doit être améliorée pour permettre la lecture directe des valeurs des paramètres et de donner plus de précision.

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre, deux modèles ont été présentés dans le but de donner une contribution dans le domaine de la fiabilité. Le but était d'explorer de nouvelles idées afin de pouvoir améliorer l'étude et l'analyse de la fiabilité des systèmes. Un modèle pratique et flexible apporte un bénéfice en temps et en coût.

Le premier modèle présenté dans ce chapitre est le modèle à base de la fonction tangente hyperbolique. Le choix de cette fonction a été motivé par le fait que la trigonométrie hyperbolique procède une variété considérable de règles et de caractéristiques mathématique intéressantes. En plus, comme il a été présenté précédemment la fonction tangente hyperbolique peut être transformé en une distribution sur $R+$.

Le deuxième modèle, issu du modèle de Weibull a plusieurs paramètres, ce qui nécessite des méthodes d'estimation plus souple et rapides pour faciliter son utilisation. L'exploration des nouvelles méthodes d'optimisation peut apporter un plus a ce modèle, telle que les algorithmes génétiques, les algorithmes des colonies d'abeilles et autres. Ce modèle limite le temps d'observation ce qui peut présenter un inconvénient, car comme on peut le constater, la fonction de répartition tends vers l'unité dans un temps inférieur à l'infinie.

L'approche du modèle de la fonction tangente hyperbolique et le modèle de Weibull modifié proposés de fiabilité ont été testés et validés, avec des erreurs de prédiction convergente vers zéro, cette approche a permis de modéliser les actes de dégradation des composants de la turbine à gaz examinée et d'estimé et planifie la durée de dysfonctionnement de ce système de turbine à gaz.

Conclusion générale

Les installations de transport des hydrocarbures aux longues distances sur des gazoducs, sont équipées par des séries de turbines à gaz. Ces installations sont complexes et sophistiqués et demandent un niveau élevé de fiabilité, de disponibilité, de sécurité et de sûreté de fonctionnement. Dans cette thèse, nous avons proposé le développement des approches de modélisation de fiabilité pour ce type de système de turbine à gaz. La complexité et le comportement de ces systèmes augmentent la difficulté à obtenir un modèle de dégradation de ce type de machine et d'obtenir le temps nécessaire pour disposer de données et d'utiliser le retour d'expérience. Cela, nous a conduits à proposer l'évaluation de leur fiabilité. Les approches de fiabilité proposées, possèdent l'avantage d'utiliser les modèles analytiques des dégradations pour prédire leur évolution et suivre le comportement de la turbine à gaz.

Notre travail apporte quelques éléments méthodologiques et présente quelques résultats obtenus à partir de l'étude de la fiabilité du système de turbine à gaz, reflétant leur comportement. Des applications des principales lois et de distributions de fiabilité ont été utilisées sur l'exemple de la turbine à gaz examinée dans ce travail de thèse. Ce travail vise à améliorer les performances de ce système où le taux de défaillance est considéré comme le principal paramètre caractérisant la fiabilité et la base de son évaluation.

Dans **le premier chapitre**, nous avons présenté les descriptions générales des turbines à gaz et de ses principaux éléments constructifs. En outre, un tour d'horizon a été présenté autour des études réalisées ces dernières années, traitant le fonctionnement de ces types de machines tournantes. Dans ce qui a suivi, nous avons réalisé quelques applications sur des études de fiabilité de différentes turbines à gaz, dans le but de l'augmentation de l'efficacité d'utilisation de turbines à gaz en exploitation à l'aide de l'augmentation de la durée de service de cet équipement industriel. Car, l'analyse de fiabilité doit dans un premier temps permettre de détecter les défauts pour éviter toute dégradation de la turbine, mais également prévenir de l'émergence d'un problème et des répercussions sur son fonctionnement, par une planification des stratégies de maintenance.

Dans **le deuxième chapitre** nous avons présenté une étude d'état de l'art sur les différentes approches d'analyse de la fiabilité des systèmes industriels. Cela, a permis de voir globalement et rappeler, dans un premier temps, la terminologie utilisée dans la littérature scientifique relative aux différentes techniques utilisées pour les fonctions et les distributions de fiabilité, en premier lieu les bases nécessaires à la compréhension de la théorie de fiabilité. Le vocabulaire utilisé par les communautés, qui étudient et développent de ce domaine, qui est très vaste. La fiabilité d'un système industriel se construit, s'analyse et s'évalue tout au long du cycle de sa vie. En deuxième lieu nous avons présenté les principales lois de distributions et les différentes formes du taux de défaillance qui sont considérées comme la base d'évaluation de la fiabilité. Finalement, un résumé des méthodes et des outils d'analyse et d'évaluation de la fiabilité a été établi dans ce chapitre.

Dans **le troisième chapitre**, la modélisation des paramètres de fiabilité d'un système de turbine à gaz à été réalisé en utilisant les approches usuelles de fiabilité. En premier, nous avons appliqué la loi exponentielle, cette distribution est simple à utiliser, mais peu réaliste dans notre cas à cause de son taux de panne constant. Par la suite, nous avons utilisé la distribution normale, également connue sous le nom de la distribution gaussienne, elle peut représenter de sévères mécanismes d'usure en raison de la croissance rapide de sa fonction de risque donnée par son taux de défaillance. Pour remédier à l'inconvénient de loi normale dans la modélisation des données de fiabilité, la loi normale tronquée à été utilisée dans ce chapitre pour la détermination de paramètres de fiabilité de la turbine à gaz examinée. Afin de tester les approches usuelles de fiabilité, la distribution Log Normale a été aussi explorée dans ce chapitre sur l'exemple de turbine à gaz. Finalement, les distributions de Weibull et Weibull à trois paramètres ont été appliquées à la turbine à gaz examinée dans ce travail. D'après les testes réalisés sur les différentes approches de fiabilité, nous confirmons que les résultats obtenus de la fiabilité sont des estimations plus précises et réalistes dans le cas examiné sauf pour le premier cas (loi Exponentielle).

Dans le **quatrième chapitre**, deux modèles ont été proposés dans le but de donner une contribution dans le domaine de la fiabilité. Le but était d'explorer de nouvelles idées afin de pouvoir améliorer l'étude et l'analyse de la fiabilité des systèmes. Un modèle pratique et flexible apporte un bénéfice en temps et en coût. Le premier modèle présenté dans ce chapitre est le modèle à base de fonction tangente hyperbolique. Le choix de cette fonction

a été motivé par le fait que la trigonométrie hyperbolique possède une variété considérable de règles et de caractéristiques mathématique intéressantes. En plus, comme il a été présenté précédemment la fonction tangente hyperbolique peut être transformé en une distribution sur $R+$. Le deuxième modèle, issu du modèle de Weibull à paramètre de forme variable, ce qui nécessite des méthodes d'estimation plus souple et rapides pour faciliter son utilisation. L'exploration des nouvelles méthodes d'optimisation pour estimer les paramètres peut apporter un plus à ce modèle, telle que les algorithmes génétiques, les algorithmes des colonies d'abeilles et autres. Ce modèle limite le temps d'observation ce qui peut présenter un inconvénient, car comme on peut le constater, la fonction de répartition tends vers l'unité dans un temps inférieur à l'infinie.

L'approche hyperbolique et le modèle de Weibull proposées pour la fiabilité ont été testées et validée, avec des erreurs de prédiction convergente vers zéro, cette approche a permis de modéliser les actes de dégradation des composants de la turbine à gaz examinés et d'estimer et planifier la durée de dysfonctionnement de ce système de turbine à gaz.

Enfin, nous pensons que les contributions présentées dans cette thèse ouvrent de nouvelles perspectives et des travaux restent à faire afin d'améliorer ces modèles et de facilité leurs utilisation.

Par exemple : le calcul analytique de l'espérance mathématique, la variance, le coefficient d'aplatissement et le coefficient d'asymétrie et explorer l'utilisation de ce modèle dans le calcul de la fiabilité des systèmes séries et parallèles.

Bibliographies

[1]. Aarset M.V., How to identify a bathtub hazard rate. IEEE Transactions on Reliability, 1987, vol. 36, no. 1, pp. 106-108.

[2]. Abdelhafid Benyounes, Ahmed Hafaifa and Attia Daoudi, Takagi Sugeno models identification based on fuzzy data construction: Gas turbine investigation. The 1st International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID 2015), Djelfa on 29-30 March 2015, Algeria.

[3]. Abdelhafid Benyounes, Ahmed Hafaifa & Mouloud Guemana, Gas turbine modelling based on fuzzy clustering algorithm using experimental data. Journal of Applied Artificial Intelligence, Taylor & Francis, 2016, vol.30 no.1, pp.29-51.

[4]. Abdelhafid Benyounes, Ahmed Hafaifa and Mouloud Guemana, Adaptive neuro-Fuzzy modeling of an industrial Gas turbine based a exprimental data. 2nd International Conference on Automatics and Mechatronics (CIAM'2015), 10-11 November 2015, Oran, Algeria.

[5]. Abdelhafid Benyounes, Ahmed Hafaifa and Mouloud Guemana, Fuzzy logic addresses turbine vibration on Algerian gas line. Oil & Gas Journal , 2016, vol. Jan, pp. 22-28.

[6]. Abdelhafid Benyounes, Ahmed Hafaifa and Mouloud Guemana, Gas turbine parameters modelling based on fuzzy logic and artificial neural networks: Solar TITAN 130N investigation. 5ème Symposium de l'Association Algérienne de l'Industrie du Gaz AIG Sonatrach, 16-17 Février 2016, Alger.

[7]. Abdelhafid BENYOUNES, Commande floue tolérante aux défauts appliquée à la supervision des vibrations dans les turbines à gaz : Application sur une turbine TITAN 130. Thèse de Doctorat 3ème Cycle, Université de Djelfa 2016.

[8]. AFNOR, Recueil de normes françaises : Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité. Afnor-Ute, 1988.

[9]. Ahmed Hafaifa, Abdelhafid Benyounes and Mouloud Guemana, Control of an industrial gas turbine based on fuzzy model. 16th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability. September 24-27, 2015, Sozopol, Bulgaria.

[10]. Ahmed Hafaifa, Guemana Mouloud and Saadat Boulanouar, Monitoring system based on real data acquisition for vibrations control in gas turbine system. Revue de Nature & Technologie: A- Sciences fondamentales et Engineering, 2016, no. 14, pp. 13-18.

[11]. Ahmed Hafaifa, Guemana Mouloud, and Belhadef Rachid, Fuzzy Modeling and Control of Centrifugal Compressor Used in Gas Pipelines Systems. Multiphysics Modelling and Simulation for Systems Design and Monitoring, Book Chapter, Applied Condition Monitoring, 2015, vol. 2, pp.379-389.

[12]. Ahmed Hafaifa, Mouloud Guemana and Attia Daoudi, Vibration supervision in gas turbine based on parity space approach to increasing efficiency. Journal of Vibration and Control, 2015, vol. 21, pp. 1622-1632.

[13]. Ahmed Hafaifa, Belhadef Rachid, Guemana Mouloud, Reliability model exploitation in industrial system maintainability using expert system evaluation. IRF2013, 4th International Conference on Integrity, Reliability and Failure, 23-27 June 2013 in Funchal, Madeira, Portugal.

[14]. Ahmed Hafaifa, Belhadef Rachid and Mohamed Boumehraz, Reliability modelling based on incomplete data: Oil pump application. Management Systems in Production Engineering Journal (DOI 10.12914/MSPE-09-03-2014), 2014, Vol. 3 no. 15, pp 140-144.

[15]. Ahmed Zohair Djeddi, Ahmed Hafaifa, Abudura Salam and Mouloud Guemana, Reliability estimation in industrial process using Log-normal distribution: Gas turbine application. INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY SYSTEMS ISTANBUL 2015 - ICES2015, 23-25 December 2015, Istanbul-Turkey.

[16]. Ahmed Zohair Djeddi, Ahmed Hafaifa, Abudura Salam, Gas turbine reliability model based on tangent hyperbolic reliability function. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, vol 53, no. 3, pp. 723-730.

[17]. Akwasi F. Mensah and Leonardo Dueñas-Osorio, Improved reliability of wind turbine towers with tuned liquid column dampers (TLCDs). Structural Safety, vol. 47, 2014, pp. 78-86.

[18]. Antonovsky A., Pollock C. and Straker L., System reliability as perceived by maintenance personnel on petroleum production facilities. Reliability Engineering & System Safety, vol. 152, 2016, pp. 58-65.

[19]. Augé C., Utilisation d'un modèle hasard proportionnel pour estimer la fiabilité des composants mécaniques. Thèse de doctorat, l'école centrale de Lyon.

[20]. Basu A.P., Basu S.K. and Mukhopadhyay S., (Eds.). Frontiers in Reliability (Vol. 4). book of world Scientific, 1998.

[21]. Benrabeh Djaidir, Ahmed Hafaifa and Abdallah Kouzou, Performance control of gas turbines. Turbomachinery International Journal, 2015, vol. November, pp. 10-14.

[22]. Benrabeh Djaidir, Ahmed Hafaifa and Abdallaha Kouzou, Monitoring Gas Turbines Using Speedtronic Mark VI Control Systems. Pipeline & Gas Journal, 2015, vol. 242, no. 10, pp. 48-86.

[23]. Bergman B. and Klefsjö B., The total time on test concept and its use in reliability theory. Operations Research, 1984vol. 32, no. 3, pp. 596-606.

[24]. Birolini A., Quality and reliability of technical systems. Book of Springer, Berlin, 1997.

[25]. Blache K.M. and Shrivastava, A. B., Defining failure of manufacturing machinery and equipment. In Reliability and Maintainability Symposium, Annual Proceedings of IEEE, 1994, pp. 69-75.

[26]. Breikin T.V., Arkov V.Y. and Kulikov G.G., Application of Markov chains to identification of gas turbine engine dynamic models. International Journal of Systems Science, 2006, vol. 73, no. 3, pp. 197-205.

[27]. Charles E. Witherell, Mechanical failure avoidance: strategies and techniques. Book series of Technology & Engineering, Edited by McGraw-Hill, 1994.

[28]. Cheng Wei Fei, Wen-Zhong Tang and Guang Chen Bai, Novel method and model for dynamic reliability optimal design of turbine blade deformation. Aerospace Science and Technology, vol. 39, 2014, pp. 588-595.

[29]. Cocozza Thivent C., Processus stochastiques et fiabilité des systèmes. Book of Springer, Berlin, 1997.

[30]. Coolen F.P.A., Coolen-Schrijner P. and Yan K.J., Non parametric predictive inference in reliability. Reliability Engineering & System Safety, 2002, vol. 78, no. 2, pp. 185-193.

[31]. Djamel Halimi, Hafaifa Ahmed and Elahmoune Bouali, Maintenance actions planning in industrial centrifugal compressor based on failure analysis. Maintenance and Reliability, Volume 16, Issue 1, January 2014, pp. 17-21.

[32]. Duane F. Alwin, Reliability and Validity Assessment: New Approaches. International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences (Second Edition), 2015, pp. 239-247.

[33]. Dutuit, Y. et Rauzy, A. "Approximate estimation of system reliability via fault trees". Reliability Engineering & System Safety, 2005, vol. 87, no. 2, pp. 163-172.

[34]. Faraheddine.B " Fiabilité et sécurité des systèmes", Polycopies cours, Centre universitaire Larbi Ben M'Hidi, Algérie, 2008.

[35]. Farazdaghi H. and Harris P. M., Plant competition and crop yield. Nature, 1968, vol. 217, pp. 289-290.

[36]. Hamdi Taplak, Mehmet Parlak, Evaluation of gas turbine rotor dynamic analysis using the finite element method. Measurement, 2012, vol. 45, no. 5, pp. 1089-1097.

[37]. Hamed Sabouhi, Ali Abbaspour, Mahmud Fotuhi-Firuzabad, Payman Dehghanian, Reliability modeling and availability analysis of combined cycle power plants. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 79, 2016, pp. 108-119.

[38]. Hamed Sabouhi, Ali Abbaspour, Mahmud Fotuhi-Firuzabad, Payman Dehghanian, Reliability modeling and availability analysis of combined cycle power plants. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 79, 2016, pp. 108-119.

[39]. Hari Prasad M., Rami Reddy GSrividya., A., Verma A. K., Reliability estimation of passive systems using fuzzy fault tree approach. International Journal of System Assurance Engineering and Management, Volume 3, Issue 3, September 2012, pp 237-245.

[40]. Haupt E. and Schäbe H., A new model for a lifetime distribution with bathtub shaped failure rate. Microelectronics reliability, 1992, vol. 32, no. 5, pp. 633-639.

[41]. Hjorth U., A reliability distribution with increasing, decreasing, constant and bathtub-shaped failure rates. Technometrics, 1980, vol. 22, no. 1, pp. 99-107.

[42]. Hsien-Chung Wu, Bayesian system reliability assessment under fuzzy environments. Reliability Engineering & System Safety, 2004, vol. 83, no. 3, pp. 277-286.

[43]. Huber C., Limnios N., Mesbah M., and Nikulin M., Mathematical methods in survival analysis, reliability and quality of life. Book publised by John Wiley & Sons, Editions 2013.

[44]. Index ReliaSoft® ReliaSoft Corporation, System analysis reference reliability, availability and optimization. E-book chapter, edition 2003.

[45]. International Electro technical Commission, Basic safety publication, International Standard 61508-4. First edition, 1998.

[46]. ISO, International Organization for Standardization, Petroleum and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. Revision of first edition (ISO 14224:1999), 2004.

[47]. Jean-Pierre Vernier,François Monchy, Maintenance Méthodes et organisations. Livre 3ème édition de Dunod, 2010.

[48]. Jiang R., Introduction to Quality and Reliability Engineering. 2015, Springer.

[49]. Kai Wei, Sanjay R. Arwade, Andrew T. Myers and Vahid Valamanesh, Directional effects on the reliability of non-axisymmetric support structures for offshore wind turbines under extreme wind and wave loadings. Engineering Structures, 2016, vol. 106, pp. 68-79.

[50]. Kececioglu, D. (2002). Reliability engineering handbook (Vol. 1). DEStech Publications, Inc.

[51]. Komal Daejun Chang, Seong-yeob Lee, Fuzzy reliability analysis of dual-fuel steam turbine propulsion system in LNG carriers considering data uncertainty. Journal of Natural Gas Science and Engineering, vol. 23, 2015, pp. 148-164.

[52]. Kvaløy J.T. and Lindqvist B., An area based test for trend in repairable systems data. Book 1996.

[53]. Lars Skyttner, General Systems Theory: Ideas and Applications. Book edited by Singapore: World Scientific, 2001.

[54]. Louit, D. M., Pascual, R., & Jardine, A. K., A practical procedure for the selection of time-to-failure models based on the assessment of trends in maintenance data. Reliability Engineering & System Safety, 2009, vol. 94, no. 10, pp. 1618-1628.

[55]. Malik Megdiche, Sûreté de fonctionnement des réseaux de distribution en présence de production décentralisée. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2004.

[56]. Manjit Verma, Amit Kumar, A novel general approach to evaluating the reliability of gas turbine system. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2014,vol. 28, pp. 13-21.

[57]. Manjit Verma and Amit Kumar, A novel method for ranking of vague sets for handling the risk analysis of compressor system. Applied Soft Computing, 2015, vol. 26, pp. 202-212.

[58]. Marcello Braglia, Gionata Carmignani, Marco Frosolini, Francesco Zammori, "Data classification and MTBF prediction with a multivariate analysis approach". Reliability Engineering & System Safety, Volume 97, Issue 1, January 2012, Pages 27-35.

[59]. Massey Jr.F.J., The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. Journal of the American statistical Association, 1951, vol. 46, no. 253, pp. 68-78.

[60]. Maurizio Bevilacqua, Marcello Braglia, Roberto Montanari, "The classification and regression tree approach to pump failure rate analysis". Reliability Engineering & System Safety, 2003, vol. 79, no. 1, pp. 59-67.

[61]. Mohamed Arezki Mellal, Enrico Zio, A penalty guided stochastic fractal search approach for system reliability optimization. Reliability Engineering & System Safety, 2016, vol. 152, pp. 213-227

[62]. Mohamed Ben Rahmoune, Ahmed Hafaifa and Mouloud Guemana, Vibration modeling improves pipeline performance, costs. Oil & Gas Journal, 2015, vol. Mars, pp. 98-100.

[63]. Mohamed Ben Rahmoune, Ahmed Hafaifa, Mouloud Guemana, Fault diagnosis in gas turbine based on neural networks: Vibrations speed application. Proceedings of the International Conference on Acoustics and Vibration ATAVI'16, March 21-23, 2016, Hammamet -Tunisia.

[64]. Mohamed Ben Rahmoune, Ahmed Hafaifa and Mouloud Guemana, Neural network monitoring system used for the frequency vibration prediction in gas turbine. 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT), IEEE proceeding 2015

[65]. Mohammad Modarres, Mark Kaminskiy, Vasiliy Krivtsov, Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide. Book publised by CRC Press, 1999.

[66]. Moncelet, G. "Application des RdP à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques du monde automobile". PhD thesis, LAAS, Toulouse. 1998.

[67]. Moore D. F., A Review of applied survival analysis: Regression modeling of time-to-event data, by DW Hosmer, S. Lemeshow, and S. May, New York: Wiley, 2008, ISBN 978-0-471-75499-2, 2008

[68]. Mouloud Guemana, Ahmed Hafaifa and Mohamed Ben Rahmoune, Reliability study of gas turbines for improving their availability by ensuring optimal exploitation. OIL GAS European Magazine, 2015, vol. 2, pp. 88-91.

[69]. Mudholkar G.S. and Srivastava D. K., Exponentiated Weibull family for analyzing bathtub failure-rate data. IEEE Transactions on Reliability, 1993, vol. 42, no. 2, pp. 299-302.

[70]. Murthy D. N., Prabhakar, Xie Min and Jiang Renyan, Weibull Models. Book published by John Wiley & Sons 2004.

[71]. Murthy D.P., Xie M. and Jiang R., Weibull models (Vol. 505). Book of John Wiley & Sons, 2004.

[72]. Nadji Hadroug, Ahmed Hafaifa and Mouloud Guemana, Détection des défaillances d'une turbine à gaz de type SOLAR à base des techniques d'intelligence artificielle. 10ème Edition des Journées Scientifiques et Techniques, SONATRACH JST10, 5-8 Novembre 2015 Oran, Algérie.

[73]. Natalia Svensson Harari, Design process of flexible assembly systems. Theses of the School of Innovation, Design and Engineering, Mälardalen University, Sweden, 2015.

[74]. Navarro J. and Hernandez P.J., How to obtain bathtub-shaped failure rate models from normal mixtures. Probability in the Engineering and Informational Sciences, 2004, vol. 18, no. 4, pp. 511-531.

[75]. Need R., Rampersad V. and Riverol C., Reliability evaluation of a gas turbine water wash system – A case study. Journal of Natural Gas Science and Engineering, vol. 24, 2015, pp. 457-463.

[76]. Nieuwhof, G.W.E., The concept of failure in reliability engineering. Reliability engineering, (1984), vol.7, no.1, pp. 53-59.

[77]. Olgierd Hryniewicz, "An evaluation of the reliability of complex systems using shadowed sets and fuzzy lifetime data". International Journal of Automation and Computing, 2006, vol. 3, no. 2, pp. 145-150.

[78]. Olivier Basile, Pierre Dehombreux et Fouad Riane, Caractérisation de la fiabilité des systèmes soumis à des sollicitations variables. ebook Matlab édition 2005.

[79]. Olivier Gaudoin, Fiabilité des systèmes et des logiciels. Notes de cours, Ecole Nationale Supérieure d'Informatique et de Mathématiques Appliquées de Grenoble 2015.

[80]. Ouakki Walid, Prise en compte de la fiabilité en conception. Mémoire de l'Université de Laval, 2011.

[81]. Pengfei Wei, Jingwen Song, Zhenzhou Lu and Zhufeng Yue, Time-dependent reliability sensitivity analysis of motion mechanisms. Reliability Engineering & System Safety, vol. 149, 2016, pp. 107-120.

[82]. Pham Hoang, Handbook of reliability engineering. Book edited by Springer London and New York, 2003.

[83]. Pham Hoang, System software reliability. Book publised by Springer Series in Reliability Engineering, 2006.

[84]. Procaccia H., Ferton E. et Procaccia M., Fiabilité et maintenance des matériels industriels réparables et non réparables. 2011, Lavoisier.

[85]. Qimi Jiang, Chun-Hsien Chen, A numerical algorithm of fuzzy reliability. Reliability Engineering & System Safety, 2003, vol. 80, no. 3, pp. 299-307.

[86]. Belhadef Rachid, Hafaifa Ahmed and Kouzou Abdallah, Reliability modelling based on Weibull distribution to improve the pump availability control parameters. The 3rd International Conference on Information Processing and Electrical Engineering (ICIPEE'14) , 24-25 November 2014, Tebessa, Algeria.

[87]. Rajarshi S. and Rajarshi M. B., Bathtub distributions: A review. Communications in Statistics-Theory and Methods, 1988, vol. 17, no. 8, pp. 2597-2621.

[88]. Rajiv Kumar Sharma, Dinesh Kumar and Pradeep Kumar, Modeling system behavior for risk and reliability analysis using KBARM. Quality and Reliability Engineering International, 2007, vol. 23, no. 8, pp. 973–998.

[89]. Ramin Gholizadeh, Aliakbar Mastani Shirazi, Bahram S. Gildeh, Eynollah Deiri, Fuzzy Bayesian system reliability assessment based on Pascal distribution. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2010, vol. 40, no. 1-6, pp. 467-475.

[90]. Rausand M. and Høyland A., System reliability theory: models, statistical methods, and applications (Vol. 396). book of John Wiley & Sons, 2004.

[91]. Rinne H., The Weibull distribution: a handbook. 2008, book of the CRC Press.

[92]. Rotshtein A. P., Shtovba S. D., Modeling of the human operator reliability with the aid of the Sugeno fuzzy knowledge base. Automation and Remote Control, 2009, vol. 70, no. 1, pp 163-169.

[93]. Rotshtein A. P., Shtovba S. D., Predicting the reliability of algorithmic processes with fuzzy input data. Cybernetics and Systems Analysis, 1998, vol. 34, no. 4, pp. 545-552.

[94]. Sadlon R. J., Mechanical Applications in Reliability Engineering, No. RAC-NPS. Reliability analysis center rome ny, 1993.

[95]. Society of Automotive Engineers, Incorporated, Reliability and Maintainability Guideline for Manufacturing Machinery and Equipment. Book 2nd Edition in 1999.

[96]. Stephens M. A., EDF statistics for goodness of fit and some comparisons. Journal of the American statistical Association, 1974, vol. 69, no. 347, pp. 730-737.

[97]. Subrata Chakraborty and Palash Chandra Sam, Probabilistic safety analysis of structures under hybrid uncertainty. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, vol. 70, no. 4, pp. 405–422.

[98]. Sudret B., Uncertainty propagation and sensitivity analysis in mechanical models. Contribution to structural reliability and stochastic spectral methods. PhD thesis, école Nationale des Ponts et Chausées, canada , 2007.

[99]. Verma R., Roy N. and Ganguli R., Gas turbine Diagnostics using a soft computing approach. applied Mathematics an computation, 2006, vol. 172, no. 2, pp. 1342-1363.

[100]. Weibull W., A Statistical distribution function of wide applicability. Journal of Applied Mechanics, 1951, vol. 18, pp. 293–297.

[101]. Wang F.K., A new model with bathtub-shaped failure rate using an additive Burr XII distribution. Reliability Engineering & System Safety, 2000, vol. 70, no. 3, pp. 305-312.

[102]. Wang F.K., Quality Evaluation of a Manufactured Product with Multiple Characteristics. Quality and Reliability Engineering International, 2006, vol. 22, no. 2, pp. 225-236.

[103]. Weibull W., A statistical theory of the strength of materials (No. 151). Generalstabens litografiska anstalts förlag, 1939.

[104]. Wenliang, L.J.F., System reliability analysis of RC frames [J]. China Civil Engineering Journal, 11, 004. 2008

[105]. Wenliang Fan, Pengchao Yang, Alfredo H-S. Ang, Zhengliang Li, Analysis of complex system reliability with correlated random vectors. Probabilistic Engineering Mechanics, vol. 45, 2016, pp. 61-69.

[106]. Wikipedia, Système. Principes et règles, Wikipedia.

[107]. William Wessels, Practical reliability engineering and analysis for system design and life-cycle Sustainment. Edited by CRC Press, 2010.

[108]. Xie M. and Lai, C.D., Reliability analysis using an additive Weibull model with bathtub-shaped failure rate function. Reliability Engineering & System Safety, 1996, vol. 52, no. 1, pp. 87-93.

[109]. Xu Zhang, Liping Sun, Chunhui Ma, Ethan Fassezke, Hai Sun, A reliability evaluation method based on the weakest failure modes for side-by-side offloading mooring system of FPSO. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 41, 2016, pp. 129-143.

[110]. Yao Hsu, Wen-Fang Wu, Yung-Chang Chang, Reliability Analysis of Wind Turbine Towers. Procedia Engineering, vol. 79, 2014, pp. 218-224.

[111]. Yeon-Seung Lee, Byung-Lyul Choi, Ji Hyun Lee, Soo Young Kim, Soonhung Han, Reliability-based design optimization of monopile transition piece for offshore wind turbine system. Renewable Energy, vol. 71, 2014, pp. 729-741.