

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

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES



**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie
Laboratoire de Fiabilité des Equipements et Matériaux**

Mémoire de Magister

Présenté par

MEBARKIA Djalal

Filière : Génie Mécanique

Option : Fiabilité et Maintenance Industrielle

**Recherche d'une solution optimale d'exploitation et de maintenance des
gazoducs algériens tenant compte de la fiabilité des équipements des
différentes lignes**

Devant le jury composé de :

M ^r AISSANI	Slimane	Professeur UMBB	Président
M ^r ABDELBAKI	Noureddine	Professeur UMBB	Examineur
M ^r LAGGOUNE	Redouane	MC/A Université de Bejaia	Examineur
M ^r BENMOUNAH	Amar	MC/A UMBB	Rapporteur

Année Universitaire : 2012/2013

Remerciement

Je tiens tout d'abord à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à Monsieur **Ammar BENMOUNAH**, Maître de conférences à l'Université M'HAMED BOUGARA de BOUMERDES de m'avoir encadré et soutenu durant cette formation de magister. Je le remercie également pour son aide précieuse, les conseils et les connaissances dont il a su me faire profiter. Il m'est difficile d'exprimer en quelques mots toute l'admiration que je lui porte.

J'ai été profondément honoré que Monsieur **Sliman AISSANI** professeur à l'Université M'HAMED BOUGARA de BOUMERDES est accepté la présidence de mon jury de mémoire. Je tiens à le remercier vivement de la confiance qu'il place dans mes travaux.

J'exprime ma plus profonde gratitude à Monsieur **Redouane LAGGOUNE**, Maître de conférences à l'Université BEJAIA et à Monsieur **Noureddine ABDELBAKI**, professeur à l'Université de BOUMERDES, de m'avoir honoré en acceptant d'être examinateurs.

Je ne veux certainement manquer cette occasion pour remercier ma famille et surtout **mes parents** pour le soutien moral indéfectible, et le dévouement dont ils ont fait preuve.

Une pensée sincère à ma très chère femme **Imane** qui est arrivée dans ma vie au beau moment pour me soutenir durant toute la durée de préparation, elle a su m'écouter, supporter ma mauvaise humeur, mes angoisses et mon caractère insupportable. Elle a su me soutenir et s'occuper de moi. Elle a été mon «beau soleil». Je lui dédie également ce mémoire en témoignage de son affection, de son amour, de son soutien moral, de sa patience, de sa gentillesse, de sa bonté et de sa grande générosité.

Je ne peux oublier tous mes amis qui m'ont accompagnée tout au long de ce parcours périlleux et qui n'ont pas cessé de me soutenir moralement et de m'encourager.

Sommaire

Introduction Générale	01
 Chapitre 01 : description des installations de transport du gaz	
1.1 Description des installations de transport du gaz	08
1.2. Contraintes sur les installations	10
1.2.1 Contraintes Dues A l'environnement	10
1.2.2 Contraintes de fonctionnement et de mise en œuvre	10
1.2.3. Contraintes s'exerçant Sur Une Turbine A Gaz	11
1.2.3.1. Compresseur d'air	11
1.2.3.2. Chambre de combustion	11
1.2.3.3. Distributeurs de turbine.....	12
1.2.3.4. Turbine	12
1.2.3.5. Lignes d'arbres.....	12
1.2.3.6. Etanchéités	12
1.2.3.7. Circuits annexes	12
1.2.3.8. Contrôle commande et régulation.....	13
1.3. Phénomènes physiques de dégradation des installations industrielles.....	13
1.3.1. Cas des installations dynamiques	13
1.3.1.1. Rupture par fissuration	13
1.3.1.2. Fatigue des matériaux.....	13
1.3.1.3. L'usure Et l'érosion.....	13
1.3.1.4. Fluage.....	13
1.3.2. Cas De La Partie Linéaire d'un Pipeline.....	14
1.3.2.1 Eclatement de Gazoducs.....	14
 Chapitre 02 : Maintenance industrielle	
2.1 Introduction.....	16
2.2 La maintenance corrective	16
2.3 La maintenance préventive systématique	17
2.4 La maintenance préventive conditionnelle	18
2.5 Coûts de maintenance	19
2.5.1. Différents types de conséquences sur le fonctionnement	19
2.5.2 Coût de la politique de maintenance	21
2.5.3 Coûts directs de maintenance.....	23
2.5.4 Coûts indirects de maintenance.....	23

Sommaire

2.5.5 Coûts de remise en marche.....	23
2.6 Conclusion	24

Chapitre 03 : Fiabilité maintenabilité et disponibilité en mécanique

3.1. INTRODUCTION.....	25
3.2. FIABILITE.....	25
3.2.1. Intérêts de la fiabilité en mécanique.....	25
3.2.2. Principales caractéristiques de la fiabilité.....	26
3.2.3. Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité.....	27
3.2.3.1 La loi exponentielle	27
3.2.3.2. La loi normale (Laplace-Gauss)	27
3.2.3.3. La loi de Weibull.....	28
3.2.3.4 La loi Log-normale (ou de Galton).....	29
3.2.3.5 La loi Gamma.....	29
3.2.3.6 La loi uniforme.....	30
3.2.3.7 La loi du Khi-deux.....	30
3.2.3.8 Loi de distribution combinée.....	31
3.2.3.9 La loi de Birnbaum – Saunders.....	32
3.2.4. Spécificité de la fiabilité en mécanique.....	33
3.2.4.1. Les différentes phases du cycle de vie d'un produit.....	33
3.2.4.2. Taux de défaillance pour des composants mécaniques.....	33
3.2.5 Analyse des modes de panne - arbres des causes.....	34
3.2.5.1. Classification des défaillances en fonction des effets	35
3.2.5.2. Outils d'évaluation de la F.M.D.....	37
3.2.6 Différents cas de situation pour l'évaluation de la fiabilité.....	38
3.2.6.1 L'analyse de la criticité	39
3.2.7 Recueils de données de la fiabilité des équipements mécaniques.....	40
3.2.7.1 Données de fiabilité pour des composants mécaniques.....	40
3.2.7.2 Limite d'utilisation des bases de données mécaniques.....	42
3.2.8 Utilisation de l'inférence bayésienne.....	43
3.2.8.1. Utilisation du nombre et la nature des données du retour d'expérience	44
3.2.8.2. Prise en compte des modifications d'équipement.....	45
3.2.9. Fiabilité des systèmes à taux de défaillance et de réparation constants	45

Sommaire

3.2.9.1. Redondance active totale, partielle.....	45
3.2.9.1.1. Redondance active totale.....	45
3.2.9.1.2. Redondance active partielle.....	46
3.2.9.2 Redondance séquentielle (ou de stockage).....	46
3.2.9.2.1. Equations générales dans le cas d'un taux de défaillance nul	46
en stockage	
3.2.9.2.2. Equations générales dans le cas d'un taux de défaillance non	47
nul en stockage.....	
3.3. MAINTENABILITE	47
3.3.1. Définition.....	48
3.4 DISPONIBILITE	51
3.4.1. Définition	51
3.4.2 Définition probabiliste	51
3.5 Détermination des caractéristiques de fiabilité.....	53
3.5.1 Détermination des caractéristiques de fiabilité des TAG	53
3.5.1.1 Représentation des indices TC.....	54
3.5.1.2 Résultats de l'étude des paramètres d'exploitation des TAG.....	54
3.5.1.3 Paramètres de fiabilité.....	54
3.5.1.4 Interprétation des résultats.....	56
3.5.2 Etudes statistiques sur les turbocompresseurs de la station de compression	57
d'Ain Naga du gazoduc Enrico Mattei reliant Hassi Rmel à l'Italie.....	
3.5.2.1 Application du test de Fisher.....	57
3.5.2.2 Le test de Kolmogorov pour le temps d'exploitation	58
3.5.2.3 Estimation de λ	59
3.5.2.4 Test de Kolmogorov pour les temps de réparation	61
3.5.2.5 Estimation de taux de réparation μ	61
3.6 Application des chaines de Markov pour la modélisation de la disponibilité et la	62
fiabilité.....	
3.6.1 Théorie des chaines de Markov.....	62
3.6.1.1 Application à la fiabilité.....	63
3.6.1.2 Application à la disponibilité.....	63

Sommaire

3.6.1.3 Fiabilité, disponibilité des systèmes mis en redondance	64
3.6.1.3.1 Redondance active totale	64
3.6.1.3.2 Redondance active partielle.....	64
3.6.1.3.3 Redondance séquentielle totale.....	65
3.6.1.3.4 Redondance séquentielle partielle.....	65
3.6.2 Calcul de la disponibilité et la fiabilité des TC des stations de compression ..	66
3.6.2.1 Calcul de la disponibilité et de la fiabilité d'un système TC de la configuration (1+1) (redondance active).....	66
3.6.2.2 Calcul de la disponibilité et de la fiabilité d'un système TC de la configuration (3+1) et (3+0).....	72
3.6.2.3 Interprétation des résultats	74
3.7 Conclusion	75
Chapitre 04 : Utilisation de la théorie des files d'attente et la théorie de Markov pour la résolution des problèmes de disponibilité des installations	
	76
4.1 Introduction	
4.2 Théorie des files d'attente.....	76
4.2.1 Processus de Poisson.....	77
4.2.2 Processus des Services.....	77
4.2.2.1 La loi Exponentielle.....	77
4.2.2.2 lois d'Erlang.....	77
4.2.3 Le système sans file d'attente	78
4.2.3.1 Régime stationnaire d'entretien.....	82
4.2.4. Cas de système avec files d'attente	83
4.2.4.1. Système avec files d'attente avec découragement	84
4.2.4.2. Système avec files d'attente sans découragement.....	88
4.2.5 Application de la théorie des files d'attente dans la base de maintenance de Biskra.....	90
4.2.5.1 Interprétation des résultats	93
4.2.6 conclusion	93
4.3. Amélioration de la disponibilité des gazoducs.....	94
4.3.1. Amélioration de la disponibilité des conduites	94
4.3.1.1. Conduite d'interconnexion	94

Sommaire

4.3.1.2	Contrôle et suivi des canalisations.....	95
4.3.1.3	Redondance des tronçons de canalisation du gazoduc.....	95
4.3.2.	Amélioration de la disponibilité des turbocompresseurs	95
4.3.2.1	03 compresseurs parmi 4 en redondance active partielle.....	96
4.3.2.1.1	03 Compresseurs parmi 4 avec 01 seul réparateur	96
4.3.2.1.2.	03 compresseurs parmi 4 avec 04 réparateurs.	96
4.3.2.2.	Redondance séquentielle partielle (03 compresseurs parmi 4 et 01 en réserve)	97
4.3.2.2.1	03 compresseurs parmi 4 et 01 en réserve avec 01 seul réparateur	97
4.3.2.2.2	03 compresseurs parmi 4 et 01 en réserve avec 04 réparateurs	97
4.3.3	Amélioration de la disponibilité a la base de la maintenance	98
4.3.4.	La gestion des stocks	99
Conclusion générale		102

Chapitre 03

Figure 3.1	Courbes de la distribution de Weibull	29
Figure 3.2	Courbe en baignoire pour les composants électroniques	33
Figure 3.3	La courbe du taux de défaillance en mécanique	34
Figure 3.4	Arbres des causes	36
Figure 3.5	Equivalence arbre des causes / diagramme de fiabilité	36
Figure 3.6	Principe de l'inférence bayésienne	43
Figure 3.7	Le chronogramme d'une machine en fonctionnement	53
Figure 3.8	Histogramme des ratios TC	54
Figure 3.9	Histogramme de la fonction $\lambda(t)$	55
Figure 3.10	Histogramme de la fonction de répartition $F(t)$	55
Figure 3.11	Histogramme de temps de bon fonctionnement	58
Figure 3.12	Courbe de la fiabilité $R(t)$	59
Figure 3.13	Histogramme de temps de réparation	60
Figure 3.14	Courbe de la maintenabilité	61
Figure 3.15	Graphe d'état	62
Figure 3.16	Graphe d'état pour système non réparable	62
Figure 3.17	Graphe d'état pour système réparable	63
Figure 3.18	Graphe d'état de redondance séquentielle totale	65
Figure 3.19	Graphe d'état de redondance séquentielle partielle	65
Figure 3.20	Graphe des états de la disponibilité	66
Figure 3.21	Graphe des états de la disponibilité	68
Figure 3.22	Graphe de l'état de fiabilité	71
Figure 3.23	Graphe de l'état de disponibilité	72
Figure 3.24	Graphe de l'état de la fiabilité	72
Figure 3.25	Graphe de l'état de disponibilité	73
Figure 3.26	Graphe de l'état de la fiabilité	73

Chapitre 04

Figure 4.1	Schéma d'un atelier de réparation	76
Figure 4.2	Système sans files d'attente	78
Figure 4.3	Schéma d'interconnexion entre gazoduc 01 et 02	95
Figure 4.4	Graphe d'état de la redondance Active (1 réparateur.)	96
Figure 4.5	Graphe d'état de la redondance Active (4 réparateurs.)	96

Figure 4.6 Graphe d'état de la redondance passive a 1 réparateur	97
Figure 4.7 Graphe d'état de la redondance passive a 04 réparateurs.	97

Chapitre 01

Tableau 1.1 Evolution des conditions de transport des gazoducs	09
---	----

Chapitre 02

Tableau 2.1 Types des maintenances	19
---	----

Chapitre 03

Tableau 3.1 Principales propriétés de la distribution exponentielle	27
--	----

Tableau 3.2 Principales propriétés de la distribution normale	27
--	----

Tableau 3.3 Principales propriétés de la loi de weibull	28
--	----

Tableau 3.4 Principales propriétés de la distribution log-normal	29
---	----

Tableau 3.5 Principales propriétés de la distribution Gamma.....	30
---	----

Tableau 3.6 Formules des indices de fiabilité	34
--	----

Tableau 3.7 Correspondance Indice d'occurrence et taux de défaillance.....	39
---	----

Tableau 3.8 Correspondance Indice d'occurrence et taux de réparation (réparation/heure)	40
---	----

Tableau 3.9. Recueils de données de fiabilité en mécanique	39
---	----

Tableau 3.10 Principales lois de Maintenabilité	49
--	----

Tableau 3.11. Calcul des indices des TC_1 , TC_2	53
---	----

Tableau 3.12 Heures d'exploitation	57
---	----

Tableau 3.13 Test de Kolmogorov pour le temps d'exploitation	58
---	----

Tableau 3.14. Estimation de défaillance λ	59
--	----

Tableau 3.15. Heures de réparation	60
---	----

Tableau 3.16. Test de Kolmogorov pour les temps de reparation	61
--	----

Tableau 3.17. Estimation de taux de réparation	61
---	----

Tableau 3.18 Résultat de la disponibilité configuration (1+1)	67
--	----

Tableau 3.19 Résultat de la fiabilité configuration (1+1).	68
---	----

Tableau 3.20 Résultat de la disponibilité configuration (1+1)	70
--	----

Tableau 3.21 Résultat de la fiabilité pour la configuration (1+1).	71
Tableau 3.22 Résultat de la disponibilité pour la configuration (3+1)	72
Tableau 3.23 Résultat de fiabilité pour la configuration (3+1)	73
Tableau 3.24 Résultat de la disponibilité pour la configuration (3+0)	73
Tableau 3.25 Résultat de fiabilité pour la configuration (3+0)	74

Chapitre 04

Tableau 4.1. Résultats de calcul des files d'attente dans la base de maintenance ...	92
Tableau 4.2 Résultats de la disponibilité des machines en redondance	98

Liste des abréviations et symboles :

Chapitre 02

- C_{p.m}** Coût de la politique de maintenance
C_d Coûts directs de maintenance
C_{ind} Coûts indirects de maintenance
C_{r.m} Coûts de remise en marche

Chapitre 03

- R(t)** Fiabilité
F(t) Fonction de répartition
A(t) Disponibilité
M(t) Maintenabilité
MTTF Durée moyenne de fonctionnement avant la première panne
MTBF Durée moyenne entre deux pannes consécutives
MTTR Durée de moyenne de réparation effective
MUT Durée moyenne de bon fonctionnement après réparation
MDT Durée moyenne d'immobilisation pour réparation (durée de réparation effective + temps perdu pour la préparation de l'opération de réparation + temps de remise en marche)
 $\lambda(t)$ Taux de défaillance
 $\Phi(t)$ La fonction de répartition de la loi normale centrée réduite.
 β Paramètre de forme (loi de Weibull)
 η Paramètre d'échelle (loi de Weibull)
 γ Paramètre de position (loi de Weibull)

Chapitre 04

- T_{Moy att}** Durée moyenne d'attente dans la file
 $\mu(t)$ Taux de réparation

v (t) Densité d'attente

P Le nombre moyen de demande de travaux de réparation durant le temps de réparation d'une demande (d'une machine)

B Le nombre moyen de libération de la file d'attente durant le temps de réparation d'une demande(d'une machine)

m_k Nombre moyen de demande en attente

P_H Probabilité que la pièce défectueuse quitte la file d'attente sans être réparée

Q Probabilité que la pièce entrant dans le système soit servie

INTRODUCTION

Les gazoducs sont des installations complexes destinés au transport du gaz naturel par canalisation qui peuvent être considéré comme des macrosystèmes composés d'un certain nombre de stations de compression (SC), L'équipement principal des SC est constitué de turbocompresseurs (TC) disposés généralement en parallèle.

La FMD (Fiabilité Maintenabilité Disponibilité) des installations, est un ensemble de propriétés d'un système qui permet à ses utilisateurs de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur délivre.

La vie d'un système est perçue par ses utilisateurs comme une alternance entre deux états du service délivré par rapport à l'accomplissement de la fonction du système, ces deux états du service sont le service correct, où le service délivré accomplit la fonction du système, et le service incorrect, où le service délivré n'accomplit pas la fonction du système.

Une défaillance est alors une transition de service correct à service incorrect, et une transition de service incorrect à service correct est une restauration. La quantification de l'alternance entre ces deux états du service permet de définir les mesures de la disponibilité et la fiabilité des installations. L'évaluation dont il s'agit est une évaluation probabiliste et les modèles utilisés sont basés principalement sur les processus de Markov..

Pour le cas des gazoducs algérien, la « jeunesse » de ces types d'installation, font que les recherches sur l'évaluation de la disponibilité des gazoducs sont très récentes. Nous pouvons citer :

- 1) R.Laggoune [1] a étudié l'analyse de retour d'expérience pour l'optimisation de la maintenance dans une raffinerie de pétrole (Skikda) cas d'un compresseur.
- 2) K .Younsi [2] a étudié la modélisation de la fiabilité d'une chaîne GNL dans un environnement faible en données statistiques.
- 3) M .Bettayeb. E.Bouali .N.Abdelbaki. M.Gaceb [4] cet article traite la modélisation des défauts rencontrés dans les canalisations et la simulation de la propagation de ses fissures par fatigue et l'étude du comportement de ces canalisations en présence d'un défaut du point de vue effondrement plastique et rupture fragile qui représentent les deux principales modes de défaillance dans les conduites de transport des hydrocarbures, dans le but de calculer la durée de vie résiduelle de ces canalisations pour optimiser les périodicités d'inspections par outils intelligents.

- 4) N.Abelbaki.. E.Bouali . M.Gaceb M .Bettayeb [5] .L'objet de cet article est de présenter une méthode simplifiée pour l'étude de l'admissibilité des défauts et mode de défaillance dans un gazoduc . basé sur la mécanique de la rupture et le calcul par la méthode des élément finis. Afin de constituer un diagramme d'admissibilité des défauts (FAD), afin de maximiser la sécurité et minimiser les couts d'exploitation
- 5) Ziane Mohamed [6] a étudié l'évaluation des indices de fiabilité d'un groupe turbocompresseur.
- 6) Doumi Hamed [7] a étudié l'analyse de la fiabilité structurale du risque de pipe corrodé.

Les principaux éléments probabilistes permettant de mesurer la fiabilité sont recueillis dans les ouvrages suivants :

- 7) B. Gnédénko, Y Beliaev, A. Soloviev [8] Ont présenté les méthodes mathématiques utilisées pour l'analyse de fiabilité.
- 8) A. Aissani [9] à étudié les modèles stochastiques de la théorie de fiabilité.
- 9) Pagès et Gondran [10] nous présentent une synthèse des travaux et les méthodes d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes. Ils ont été étroitement associés aux préoccupations d'Electricité de France concernant la fiabilité des centrales, des réseaux de transport et d'interconnexion, et en particulier, ils ont travaillé sur un programme d'études probabilistes pour la sûreté des centrales nucléaires. Partant de l'exemple de la centrale à eau sous pression de Fessenheim, les objectifs principaux de ce programme sont d'une part, de développer les méthodes d'examen de la fiabilité des systèmes complexes et de constituer les codes de calcul nécessaires, et d'autre part, d'appliquer ces résultats à l'optimisation des systèmes de sûreté des futures centrales nucléaires.
- 10) Le travail Villemeur [11] est le résultat de plusieurs années de pratique et de réflexion, de recherche personnelle et en équipe, trouvant des solutions à des problèmes concrets. Cet ouvrage est structuré en six parties dont les plus intéressantes pour notre travail sont :
 - Première partie : Introduction aux méthodes de l'analyse de la sureté de fonctionnement, dont il a présenté Historique du développement de la sûreté de fonctionnement des systèmes, le principe de concept et principes de l'analyse prévisionnelle
 - Deuxième partie : Principales méthodes tel que AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets), APD (Analyse Préliminaire des Dangers) ,MDS (Méthode de diagramme de Succès) (MAC) Méthode de l'Arbre des Causes

- Troisième partie : Méthodes spécifique dans chaque domaine mécanique, logiciel, des facteurs humains.
- 11) Procaccia et Henri [12] ont présenté les principaux éléments probabilistes permettant de mesurer les indices de fiabilité utilisant la théorie de la décision statistique fréquentielle et bayésienne.
- 12) J.L.Bon [13] a proposé dans son ouvrage une synthèse des méthodes mathématiques de la théorie de la fiabilité, appropriées chacune à des systèmes de complexité variable. La première partie de cette étude analyse la fiabilité d'un élément ou d'un composant non réparable. L'auteur en caractérise la durée de vie et met en évidence la notion de vieillissement. Il montre en particulier l'utilité pratique de la loi exponentielle pour approcher la distribution des temps de panne. La deuxième partie vise à déterminer la fiabilité d'un système non réparable à partir de ses composants. L'ouvrage recourt à la notion de fonction de structure et énumère les méthodes disponibles pour le calcul de fiabilité à partir d'une modélisation de type arbre de défaillances. Enfin la troisième partie traite des systèmes réparables. La description dynamique du bon fonctionnement est effectuée par un processus stochastique discret, supposé markovien dans un premier temps. L'auteur innove ensuite en décrivant le cas semi-markovien. Il propose une solution au calcul de fiabilité pour de grands systèmes réparables et élargit ainsi considérablement le champ d'applications. Il montre que les grands systèmes fortement réparables ont une durée de bon fonctionnement proche d'une variable exponentielle. La loi exponentielle constitue ainsi le fil directeur de l'ouvrage : une analyse globale avec la notion de vieillissement ou une analyse locale avec l'hypothèse d'une réparation de chaque composant, montre qu'il est souvent possible d'établir à partir de la loi exponentielle des approximations à la fois réalistes et efficaces. Cette approche permettra aux étudiants en 3e cycle de mathématiques appliquées et aux ingénieurs d'étude ou de recherche de se familiariser avec la plupart des problèmes mathématiques rencontrés dans l'application de la théorie de la fiabilité.
- 13) Birolini [14] Cet ouvrage présente les nouveaux modèles et méthodes pour l'analyse de fiabilité et les applications de la science, l'ingénierie et la technologie. contiennent une large couverture des derniers développements et des techniques novatrices dans un large éventail de questions théoriques et numériques dans le domaine des méthodes statistiques et probabilistes de la fiabilité.
- 14) Ayyub and Mccuen [15] Cet ouvrage présente des applications des problèmes des ingénieurs pour les statistiques de fiabilité.

Il sera également montré aux lecteurs comment écrire des algorithmes de calcul pour résoudre des problèmes de probabilité et statistique.

15) H. Hoang [16] ce travail aidera les ingénieurs à trouver des solutions créatives et de fiabilité de gestion pour évaluer la fiabilité des systèmes et à améliorer les processus. Pour les projets de recherche des étudiants, il sera le point de départ idéal pour aborder les questions de base en matière de communications et de l'électronique ou de l'apprentissage des applications avancées en microsystèmes électromécaniques(MEMS),de fabrication et d'ingénierie.

16) W. Tebbi [17] à explicité dans la première partie le contexte industriel et théorique de la fiabilité mécanique ainsi que les méthodes employées ensuite elle a fait l'étude des méthodes d'essais accélérés et leurs applications en mécanique ;en particulier, une application des modèles standards de vie accélérée (SVA) à des composants soumis au dommage par fatigue, en menant des analyses théoriques, par simulation et expérimentales.

Les études portant sur l'utilisation de la théorie des files d'attente et la théorie de Markov pour la résolution des problèmes de la disponibilité des installations sont :

17) M.Guirolt [18] présente la première initiation de processus de Markov

18) Les travaux Jean Claude et Alain Delage [19] nous présente une modélisation de la disponibilité d'un système de transport par les chaine de Markov, les auteurs ont constaté que la modélisation de la disponibilité par le processus de Markov présente par rapport à des méthodes de simulation un certain nombre de limite :

- La première liée a la théorie même des processus markovienne.
- La deuxième, liée à un traitement des matrices de grandes dimensions.
- La troisième étant la difficulté de construire un diagramme markovien.

19) J Doudin, E.Pommiés, .P.varrell[20] ont présenté une modélisation stochastique de la maintenance d'une ligne de métro, la modélisation a été utilisé pour simuler le comportement du système de maintenance des trains d'une ligne de métro, dans le but d'étudier l'interaction entre la logistique de maintenance ,l'organisation des ateliers de réparations et fonctionnement de service d'exploitation.

20) Le travail de B.Sericola [21] nous a rapporté une synthèse des travaux de recherche dans un premier temps dans le domaine de l'évaluation de mesures de la sûreté de fonctionnement des

systèmes informatiques et plus récemment, dans le domaine de l'évaluation de mesures de la qualité de service des réseaux haut débit. Dans ces deux domaines l'évaluation dont il s'agit est une évaluation probabiliste et les modèles utilisés sont basés principalement sur les processus de Markov.

- 22) R .Donat [22] a présenté une modélisation de la fiabilité et de la maintenance par des modèles graphiques probabilistes et les outils utilisés pour le formalisme des modèles graphiques probabilistes statistiques et markoviens. L'exemple qui a été traité par l'auteur présente des possibilités offertes par ces outils en ce qui concerne la modélisation de ses systèmes complexes.
- 23) P. Moyal [23] nous a présenté une étude sur les systèmes des files d'attente avec client impatient où les clients ont une durée limite d'attente pour être servi, au delà de laquelle ils doivent quitter la file d'attente.
- 24) X. Zwingmann [24] a étudié le modèle d'évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception. Cette thèse vise la prise en compte de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception ainsi que le développement d'outils permettant la validation des objectifs de conception et la comparaison de plusieurs alternatives. Elle répond ainsi à une problématique importante de l'industrie (prolongement de la durée de vie, développement durable) et à l'enrichissement des outils de conception actuels.
- 25) M Terré [25] a présenté un aperçu des méthodes de modélisation du trafic et des files d'attente. Un certain nombre de formules ont été introduites. Elles permettent de dimensionner un réseau de Télécommunications. Les calculs de probabilité qui y conduisent restent finalement assez simples.
- 26) A. Benmounah [26] a présenté tout d'abord l'évaluation de ces deux paramètres (Fiabilité et Disponibilité) pour ensuite juger de la nécessité de les améliorer dans le but d'augmenter la productivité des machines.
- 27) A. Benmounah [27] a traité le problème de l'indisponibilité de la pièce de rechange avec une approche probabiliste et en particulier dans le cas de machines en attente de réparations.
- 28) A. Benmounah [28] a étudié les avantages et les inconvénients de chaque type de stratégie d'exploitation et de maintenance ainsi que l'application des chaînes de Markov pour la fiabilité et pour la disponibilité du système avec renforcement du service maintenance et réparation

introduisant le cas d'un seul réparateur disponible et le cas du nombre maximal de réparateur disponible.

À la lumière des différentes études précitées, nous proposons dans ce mémoire d'abord une évaluation totale des caractéristiques de ces trois paramètres (Fiabilité Maintenabilité et Disponibilité) en utilisant la théorie des files d'attente et le processus de Markov afin d'en tirer les conclusions visant à l'amélioration des capacités de production des équipements de transport.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres

Le premier chapitre sera consacré a une description générale sur les installations de transport du gaz ainsi que les contraintes de ses installations ;

Le deuxième chapitre porte sur des généralités de la maintenance des installations et leur l'importance fondamentale de la maintenance pour la sûreté et la productivité des installations industrielles

Le troisième chapitre, sera consacré à la théorie de la FMD (Fiabilité Maintenabilité Disponibilité), nous avons présenté les principales lois mathématiques nécessaires mesurer la FMD des installations mécaniques

Par ailleurs nous allons montrer que le calcul de la fiabilité mécanique présente des limitations et cela pour plusieurs raisons, la notion du taux de défaillance constant n'existe pas, l'absence de modèles satisfaisants pour décrire certains processus complexes de dégradation et de leur interaction, la quasi absence de normalisation et de standardisation internationales et le manque de données

Ensuite une identification des indices de fiabilité des turbocompresseurs des stations de compression. (le taux de panne et le taux de réparation) de la ligne HRmel – Skikda, l'estimation de ces indices passe préalablement par une analyse statistique complète des historiques de la durée de panne et de réparation recueillies sur site pour chaque équipement.

Enfin nous allons nous baser sur le processus de Markov pour évaluer la disponibilité des turbocompresseurs des stations de compression des gazoducs algérien

Le quatrième chapitre sera consacrée sa première partie à l'évaluation de la fiabilité des ateliers de réparation. Par la suite, nous allons traiter le cas de la base de maintenance de Biskra en utilisant la théorie de files d'attente pour évaluer la fiabilité des ateliers de réparation.

Finalement, dans la deuxième partie, et en tenant compte de tous ce que nous avons traité, nous allons proposer des solutions afin d'améliorer la disponibilité des gazoducs.

1.1.DESCRPTION DES INSTALLATIONS DE TRANSPORT DU GAZ

Les gazoducs sont des systèmes complexes étendus en longueur (plusieurs centaines de kilomètres) destinés au transport du gaz naturel par canalisation.

Un gazoduc est composé d'un certain nombre de stations de compression "SC" espacées d'une centaine de kilomètres les unes des autres et destinées à fournir l'énergie de pression nécessaire à l'écoulement du gaz dans la conduite.

Les stations de compression sont constituées principalement de turbocompresseurs "TC" assemblés en série ou en parallèle. Leur niveau de performance conditionne au plus haut point la performance d'un gazoduc, l'évaluation de la performance de ces systèmes nécessite la mise au point de modèle mathématique permettant de repérer les anomalies et les écarts qui nous sépare des standards internationaux. Cependant quelque soit le degré de sophistication de ces modèles ils ne présentent d'intérêt pratique que dans la perspective d'une estimation crédible des paramètres de fiabilité. En pratique, l'estimation de ces indices se base sur des historiques de pannes recueillies sur site pour chaque équipement.

Le transport du gaz dans des conditions économiques nécessite l'utilisation de pressions de transport élevées, et donc l'utilisation d'aciers à haute limite d'élasticité. De plus, la sécurité des installations demande une bonne ténacité pour éviter la ruine de la structure par propagation rapide de fissures.

Chaque station de compression est équipée de matériel principal suivant :

- Unités de séparation du gaz naturel principal.
- Unités de compression du gaz.
- Unités de refroidissement du gaz comprimé.

Le régime de fonctionnement de la station de compression est caractérisé par les paramètres suivants :

- La pression et la température amont de la SC,
- Le débit du gaz à comprimer,
- La pression à l'aspiration et au refoulement des compresseurs,
- Température du gaz à l'aspiration et au refoulement des compresseurs,

Les sites de production de gaz sont souvent très éloignés des centres de consommation. Le gaz est alors acheminé à l'aide de canalisations sur des distances de plusieurs milliers de kilomètres. Pour augmenter la rentabilité d'un gazoduc, il est intéressant d'utiliser des structures de diamètre plus grand et de transporter le gaz sous une pression élevée. L'évolution des conditions de transport des

gazoducs depuis 100 ans est présentée dans le tableau I.1. Nous voyons que, de 1910 à 2000, le diamètre des plus gros gazoducs ou pipelines utilisés a été multiplié par 4 et la pression de transport par 60

Année	Pression (bar)	Diamètre (pouce)	Capacité annuelle (10^6 Nm^3)	Pertes de charge après 6000 m (%)
1910	2	16	80	49
1930	20	20	650	31
1965	66	36	830	14
1980	80	56	2600	11
2000	120	64	52000	8

Tableau I.1 Evolution des conditions de transport des gazoducs

L'Activité Transport par Canalisation gère un réseau de canalisations d'une longueur de plus de 16000 km intégrant trois gazoducs destinés à l'exportation du gaz naturel. L'Enrico Mattei (GEM) relie l'Algérie à l'Italie, via la Tunisie, le Pedro Duran Farell (GPDF) relie l'Algérie à l'Espagne, via le Maroc, le MEDGAZ reliant l'Algérie à l'Espagne via la méditerranée de diamètre 24 pouces avec une capacité de 8 à 10 Gm^3 par an. Un quatrième est en construction reliant l'Algérie à l'Italie via la Sardaigne appelé GALSI. Le gazoduc Algérie-Italie via la Sardaigne devra s'étendre sur une distance totale de 1470 km environ, sa capacité initiale sera de 8 Gm^3 par an. Le gazoduc pourra desservir l'Italie, le sud de la France et les pays européens au nord des Alpes.

Le projet de construction d'un gazoduc transsaharien devant relier le Nigeria à l'Algérie. Cette conduite, d'une longueur de 4000 km environ, acheminera, via le Sahara, le gaz nigérian des champs d'Abuja jusqu'à Béni Saf, près d'Arzew. Le gazoduc permettra l'approvisionnement de la région Ouest de l'Afrique en gaz naturel et pourra, en se greffant au réseau existant en Algérie, desservir également les régions de l'Europe du sud.

Le GZ4, qui traverse six wilayas, assurera le transport du gaz naturel algérien de Hassi-R'mel à Béni Saf et alimentera le gazoduc Algérie - Espagne - Europe, le Medgaz, et alimentera, également, les centrales électriques de Hadjret Enouss et de Terga, le futur complexe d'aluminium et de pétrochimie à Béni Saf et l'alimentation des postes de distribution publique (Sonelgaz).

Le GK3/GK4 est destiné à augmenter la capacité des gazoducs GK1 et GK2 et alimentera le futur gazoduc intercontinental Galsi.

L'autre challenge auquel l'entreprise est appelée à faire face est la mise à niveau de ses installations. Ce qui lui permettra d'optimiser ses capacités d'évacuation et satisfaire une demande sans cesse croissante.

1.2. CONTRAINTES SUR LES INSTALLATIONS

L'analyse des types de défaillances a montré que la fiabilité dépend de contraintes diverses qu'il est facile de répartir en contraintes de fonctionnement, de mise en œuvre, et d'environnement. Cela explique que la fiabilité ne soit définie que dans des conditions de fonctionnement et d'environnement données. C'est d'ailleurs dans le domaine des conditions d'environnement et d'emploi que l'effort d'amélioration de la fiabilité a été le plus payant vers 1960 et très souvent les défaillances d'un matériel ont encore comme origine une mauvaise utilisation. Les contraintes d'environnement sont seulement connues avec une certaine probabilité alors que les contraintes de fonctionnement et de mise en œuvre sont déterminées à la conception et à la fabrication.

1.2.1 Contraintes dues à l'environnement

Les contraintes d'environnement peuvent exister pendant le fonctionnement mais aussi pendant le stockage. Elles sont alors mal connues et leur effet est loin d'être négligeable. On peut distinguer :

- **Les contraintes mécaniques** : chocs, vibrations, accélérations;
- **Les contraintes thermiques** : extrêmes de température ambiante, conditions de refroidissement (rayonnement, conduction, convection), chocs thermiques ;
- **Les contraintes électriques** : surtensions, surintensités, coups de foudre, champs électriques ou magnétiques intenses ;
- **Les contraintes climatiques** : degré hygrométrique, gaz corrosifs, pression atmosphérique, pollution (poussières), présence de liquides

1.2.2 Contraintes de fonctionnement et de mise en œuvre

Ce sont :

- **Les contraintes thermiques** (probablement les plus importantes) : le caractère cyclique éventuel ajoute d'autres effets (fatigue par dilatations et contractions) ;
- **Les contraintes électriques** : densité de courant, champ électrique interne, champs magnétiques ; les impédances des circuits modifient les contraintes et le caractère cyclique éventuel ajoute des effets comme ceux décrits précédemment ;

1.2.3. Contraintes s'exerçant sur une turbine à gaz

Toute machine est soumise à des contraintes internes et externes dont la connaissance est nécessaire pour cerner les processus de dégradation que la maintenance doit contenir dans les limites compatibles avec la durée de vie espérée à défaut de pouvoir les éliminer. La turbine à gaz n'échappe pas à cette règle, vitesse de rotation et température de cycle élevés, rapport : puissance / poids important, induisent des contraintes internes à ne pas négliger alors que l'environnement plus ou moins rude et les conditions de fonctionnement contribuent aux contraintes externes. On analysera successivement les différentes contraintes qui s'exercent sur:

- 1) Le compresseur d'air (CA). 2) La chambre de combustion (CC). ; 3) La turbine (HP, BP); 4) Les paliers- ligne d'arbres ; 5) L'étanchéité ; 6) Les circuits annexes ; 7) Le système de contrôle et de régulation.

1.2.3.1. Compresseur d'air**1) Contraintes internes**

- vitesse de rotation, température.
- Contraintes centrifuges sur ailettes et disques.
- Vibrations des aubages fixes difficiles à maîtriser.

2) Contraintes externes :

- Erosion : air aspiré chargé de particules abrasives.
- Corrosion : agent chimique lié à l'environnement.
- Encrassement : vapeur d'huile, poussière.

1.2.3.2. Chambre de combustion**1) Contraintes internes**

- Températures élevées :(Surchauffes locales, Brûlures d'injecteurs, Déformations).
- Vibration de combustion : (30 à 90 Hz) frétting.
- Chocs thermiques : déformation, fissures.

2) Contraintes externes :

- Corrosion à chaud : soufre et chlorures.

1.2.3.3. Distributeurs de turbine

- Mauvaise répartition de température.

1.2.3.4. Turbine**1) Contraintes internes**

- vitesse de rotation et température :
- Contraintes centrifuges sur ailettes et disques.
- Fluage, Surchauffes, Chocs thermiques, Survitesse.

2) Contraintes externes

- Surchauffes locales dues aux condensats,
- Corrosion.

1.2.3.5. Lignes d'arbres

Les lignes d'arbres de turbines industrielles comportent les paliers lisses refroidis par huile. Les turbines aéronautiques sont munies généralement de paliers à billes et à rouleaux refroidis par air.

1) Contraintes internes

Vibration, forte vitesse de rotation, température élevée, déséquilibre, charges anormales.

2) Contraintes externes :

- Mauvaise caractéristique de l'huile.
- mauvaise alignement

1.2.3.6. Etanchéités

Les étanchéités rencontrées sont de type labyrinthe ou bagues flottantes.

1) Contraintes internes : vitesse élevée, température, ajustements précis.

- Passage d'huile dans les aubages compresseur.
- Passage d'huile dans les mobiles turbines entraînant (Calamine, Encrassement, Incendie).

2) Contraintes externes : Corps étrangers, Déplacement suite aux dilatations ou jeux excessifs.**1.2.3.7. Circuits annexes**

Circuits de démarrage, Circuits de graissage, Circuits gaz carburant.

1) Contraintes internes : automatismes et sécurités.

- Electrovanes, purges, pressostats, thermostats indicateurs de passage, niveau, température.

2) Contraintes externes :

- Qualité du gaz (hydrates, condensats).
- Qualité de l'huile.

1.2.3.8. Contrôle commande et régulation

1) Contraintes internes : contrôle des paramètres interdépendants et variables (température - vitesse), sécurités.

Fonctionnement des séquences et des sécurités ; Réglage, Châssis et mesure.

2) Contraintes externes : environnement

Température ambiante, Humidité, Perturbation par circuits voisins, Qualité d'alimentation

1.3. PHENOMENES PHYSIQUES DE DEGRADATION DES INSTALLATIONS INDUSTRIELLES**1.3.1. Cas des installations dynamiques**

Les effets dus au fluage, à l'usure et à la corrosion peuvent être maîtrisés par des dimensionnements de pièces correctes et des traitements de surfaces appropriés. Les problèmes majeurs de la fiabilité en mécanique proviennent essentiellement des contraintes trop élevées et des phénomènes de fatigue. Par conséquent l'analyse de la fiabilité des structures et des systèmes mécaniques devient de plus en plus une procédure complexe [29-30-31]

1.3.1.1. Rupture par fissuration

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

1.3.1.2. Fatigue des matériaux

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

1.3.1.3. L'usure et l'érosion

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

1.3.1.4. Fluage

Le fluage est un mécanisme de dégradation lié au chargement et à la température conduisant à une déformation du matériau (allongement ou élongation). Ce mécanisme intervient dès que la

température du matériau dépasse 0.3 à 0.4 fois la température absolue de fusion (environ 400°C pour les aciers)

1.3.2. Cas de la partie linéaire d'un pipeline.

Les augmentations de performance des pipelines ont été possibles grâce à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des aciers utilisés pour la fabrication des tubes. En effet, la contrainte maximale circonférentielle d'un tube mince soumis à une pression interne est donnée par la relation suivante:

$$\sigma_H = \frac{PD}{2e} \quad (1.1)$$

Où D est le diamètre, e l'épaisseur et P la pression de service du tube.

Pour éviter une augmentation trop importante de l'épaisseur des tubes rendant les coûts de production et d'investissement rédhibitoires, il faut développer des aciers possédant une limite d'élasticité de plus en plus élevée. Les aciers sont classés d'après l'American Petroleum Institute (API). Les recherches sur la mise au point des aciers à très haute résistance sont essentielles. Pour l'acier X100, elles ont commencé dès 1978 et se poursuivent toujours.

Un gazoduc est une structure dont l'intégrité doit être garantie. En particulier, pour éviter tout amorçage de rupture, le dimensionnement de la structure est effectué pour travailler dans le domaine élastique avec un coefficient de sécurité adéquat, ce qui autorise une taille critique de défaut. De plus, la température de transition ductile-fragile de l'acier est choisie de façon à empêcher une rupture fragile du tube. Cependant, la probabilité d'amorçage n'est jamais nulle. Des statistiques établies par l'European Gas pipeline Incident Group recensent, en effet, 1060 cas de rupture en service entre 1970 et 2001. 50% de ces ruptures sont causées par des "agressions extérieures". Les autres causes d'incidents notables sont: la présence de défauts dans le matériau (17%), la corrosion (15%), ou encore les mouvements de sol (7%)

1.3.2.1. Eclatement de gazoducs

L'éclatement d'un gazoduc, dû à la propagation d'une fissure longitudinale est un problème complexe dans lequel intervient un couplage entre plusieurs disciplines : l'hydrodynamique (décompression de gaz), la déformation des coques (parois du gazoduc) et la mécanique de la rupture (comportement du matériau en pointe de fissure).

1) Décompression du gaz

Le gaz s'échappe par l'ouverture créée dans la paroi du tube par la fissure. Une onde de décompression commence alors à se propager dans le tube à une vitesse de l'ordre de 300 à 400m/s.

1) Décompression du tube

Sous l'effet de la pression du gaz sur les parois du tube ouvert, celui-ci se déforme. La section du tube passe d'une géométrie en "O" à une forme en "U" et puis reste inchangée.

2.1 INTRODUCTION

Les activités de maintenance sont d'une importance fondamentale pour la sûreté et la productivité des installations industrielles. Aussi, depuis les années 1950-1960 et les travaux de nombreuses publications proposent des modèles mathématiques permettant de définir la politique de maintenance optimale à adopter.

Généralement ces approches consistent à établir, puis à optimiser, une fonction prenant en compte les coûts de réparation, l'indisponibilité et la fiabilité du système pour une politique de maintenance définie. Les variables de décision dépendent des modèles appliqués.

Les premiers modèles de maintenance, synthétisés par [32], considèrent des systèmes mono-composants et des politiques de maintenance basées sur des structures simples. L'optimisation de la maintenance continue à faire l'objet de très nombreux travaux de recherche, avec le développement de nouveaux modèles et l'approfondissement de modèles existants, pour une meilleure prise en compte de la réalité et de la complexité induite par les systèmes et les politiques de maintenance étudiées.

Avec l'amélioration des techniques de calcul, les travaux ne considèrent plus seulement des systèmes mono composants, mais des systèmes multi-composants. Par ailleurs, avec la complexification des stratégies de maintenance, de nouveaux modèles sont développés, notamment en ce qui concerne la maintenance préventive conditionnelle,

Enfin, la prise en compte d'aspects tels que le soutien logistique ou l'effet des interventions vise à se rapprocher d'une modélisation plus réaliste de la maintenance.

On distingue généralement trois types d'actions :

2.2 La maintenance corrective

Elle est appelée aussi maintenance fortuite, accidentelle ou curative. C'est l'action d'une maintenance consécutive à une panne. On attend la panne pour agir et l'entretien devient synonyme de dépannage ou de réparation. Il y a lieu d'intervenir rapidement parce que le besoin de la machine est urgent du fait qu'elle se trouve subitement arrêtée et que cet arrêt n'étant pas programmé.

Il en résulte des détériorations profondes alors qu'un arrêt préalable le plus souvent aurait limité la panne en importance d'où les coûts sont conséquents d'autant plus que les coûts augmentent rapidement et d'une façon brutale avec l'âge des appareils.

Pour en diminuer les conséquences, on est conduit à :

- Procéder à l'analyse des modes de défaillance de leurs effets et de leur criticité (AMDEC), permettant de mettre en évidence de façon prospective un certain nombre d'organes ou de machines critiques pour la sécurité ou la fiabilité d'un système après l'inventaire des défaillances possibles.
- Installer des éléments de secours par redondance de matériels
- Utiliser des technologies plus fiables
- Rechercher des méthodes de surveillance les mieux adaptées aux points névralgiques.

La maintenance corrective devra s'appliquer automatiquement aux défaillances complètes et soudaines dites catalectiques, comme par exemple la rupture brusque d'une pièce mécanique ou le court circuit d'un système électrique. Hormis ce cas, ce type de maintenance sera réservé à du matériel peu coûteux, non stratégique pour la production et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité. Les coûts induits par une panne sont:

- 1) Coûts directs (pièces neuves, coût de révision et réparation, heures de travail)
- 2) Coûts indirects (immobilisation du capital, durée d'indisponibilité, désordre généré, réactions en chaîne sur d'autres intervenants, rentabilité / efficacité du service)
- 3) Impact sur le client (dommage aux clients, dégradation de la qualité de service, etc.)

2.3 La maintenance préventive systématique

Dans la maintenance préventive systématique, on fixe les règles strictes pour déterminer les dates de maintenance. Suivant l'importance d'un équipement dans un système, celle-ci peut s'effectuer :

- *Selon l'âge;*
- *périodique.*

Les deux premières sont plus efficaces, mais difficiles à gérer. La troisième se gère bien, mais elle est plus coûteuse en temps et en pièces de rechange. Parmi les politiques de maintenance basées sur la seule connaissance du temps de fonctionnement du système, on distingue les politiques basées sur l'âge et les politiques de blocs, [33] Les modèles associés reposent sur la représentation de l'apparition des défaillances du système, et plus précisément l'instant auquel l'évènement survient. Pour cela, ce sont essentiellement des modèles de durée de vie qui sont utilisés [33].

2.4 La maintenance préventive conditionnelle

Avec l'application des méthodes basées sur la Reliability Centered Maintenance, les politiques de maintenance ne consistent plus en des remplacements purs mais s'intéressent à l'état du système. On parle alors de maintenance préventive conditionnelle, et les décisions de maintenance sont prises en fonction du niveau de dégradation du système [34].

La maintenance préventive conditionnelle consiste à vérifier périodiquement ou continuellement l'état des pièces qui se dégradent et à n'intervenir que si l'état de dégradation est suffisamment avancé pour compromettre la fiabilité du système. Elle nécessite des moyens de mesure ou de test permettant d'apprécier l'état de dégradation.

Le principal avantage est de limiter les remises en état non nécessaires. Les gains substantiels qui sont associés la rendent objet de nombreux travaux de modélisation de maintenance [35]. Ce type de modélisation passe par la représentation du processus de dégradation qui définit la prévision de l'évolution de l'état du système. [36].

La maintenance conditionnelle dite aussi prédictive est une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé par un autodiagnostic, une information d'un capteur, d'une mesure d'une usure ou un autre outil révélateur de l'état de dégradation actuel et prématuré du bien.

L'intervention est conditionnée non pas par un échéancier mais par la mesure d'un paramètre de fonctionnement représentatif de l'usure ou de la dégradation de différents composants. Il s'agit donc de prévenir la dégradation même par une auscultation continue, périodique ou programmée

Récapitulatif

Type	Corrective	Systématique	Conditionnelle
Conditions d'intervention	Fonctionnement jusqu'à la rupture	Basée sur l'estimation de la durée de vie moyenne du composant	Intervention conditionnée par la dérive d'un paramètre significatif
Aide au diagnostic	Les outils utilisés ne servent qu'à déterminer la cause de la panne	Ajuster les échéanciers en fonction des états d'usure constatés	Analyse de l'évolution des paramètres de fonctionnement et le diagnostic sur l'origine du défaut
Applications	Machines doublées, panne acceptable et imprévisible	Graissage, petites pièces et impossibilité d'obtenir des mesures fiables	Machines stratégiques, à problème et risque de panne dangereuse
Durée de vie d'un organe	Rupture	Remplacement	Détection de défaut, analyse de tendance et réparation programmée
Coûts	Coûte cher en perte de production et en sécurité	Coûte cher en matériel	Optimise les coûts des matériels au plus près de la rupture et augmente la productivité par la programmation des arrêts nécessaires.

Tableau 2.1 Types des maintenances

2.5. COUTS DE MAINTENANCE

2.5.1. Différents types de conséquences sur le fonctionnement

Le rôle le plus souvent dévolu aux analyses de maintenance et de sûreté de fonctionnement concerne l'étude des effets d'une défaillance. Les méthodes employées visent à identifier individuellement leurs conséquences en termes de coûts. C'est le cas des systèmes où pour une

défaillance, de multiples conséquences peuvent survenir. La méthode de l'arbre des conséquences propose d'y remédier à l'aide d'un arbre de décision. Elle consiste à établir les conséquences faisant suite à un événement initiateur et selon les successions possibles des fonctionnements ou dysfonctionnements [37]. Nous avons:

- *Événement initiateur* : cause de défaillance
- *Événements* : arrêt, fonctionnement, ou fonctionnement en mode dégradé.
- *Conséquences* :
 - C₁ : coût de la politique;
 - C₂ : coût de la politique, coût direct;
 - C₃: coût de la politique, coût direct de la dégradation, coût indirect, coût remise en marche;
 - C₄: coût de la politique, coût direct d'arrêt, coût indirect, coût de remise en marche.

1. Catégorie 1 notée C₁:

Cette catégorie représente le coût de l'utilisation de la politique de maintenance notée C_{p.m}

$$C_1 = C_{p.m} \quad (2.1)$$

2. Catégorie 2 notée C₂:

Cette catégorie représente la somme du coût de la politique de maintenance C_{p.m} et du coût direct de dégradation C_{d1}. C'est le cas du fonctionnement avec dégradation sans nuisance à la production.

$$C_2 = C_{p.m} + C_{d1} \quad (2.2)$$

3. Catégorie 3 notée C₃:

Cette catégorie représente la somme du coût de la politique de maintenance C_{p.m}, le coût direct de dégradation C_{d1}, le coût indirect C_{ind1} causé par la perte de la production pour fonctionnement en mode dégradé et du coût de remise en marche C_{r.m}. C'est le cas du fonctionnement en mode dégradé avec perte de production ;

$$C_3 = C_{p.m} + C_{d1} + C_{ind1} + C_{r.m} \quad (2.3)$$

4. Catégorie 4 notée C4:

Cette catégorie représente la somme du coût de la politique de maintenance $C_{p.m}$, le coût direct C_d , d'arrêt de production C_{d2} , le coût indirect C_{ind2} causé par l'arrêt de production pour remédier à la défaillance et du coût de remise en marche $C_{r.m}$. C'est le cas où une défaillance entraîne l'arrêt de l'équipement de production avec perte de production.

$$C_4 = C_{p.m} + C_{ind2} + C_{d2} + C_{r.m} \quad (2.4)$$

Les coûts d'acquisition ou coût d'achat, de revente ou d'élimination ne sont pas pris en compte dans notre travail. Seuls les coûts cumulés de maintenance composés :

- Des coûts de la panne ou de la dégradation suivant les cas;
- Des coûts cumulés de la politique maintenance préventive;
- Des coûts de remise en marche;
- Des coûts de perte de production ou manque à gagner (main d'œuvre non utilisée, etc..);

font l'objet de développement dans l'évaluation de notre modèle car, l'objectif n'est pas d'obtenir le revenu global d'un équipement de production ou d'estimer le coût global d'acquisition également connu sous sa dénomination anglo-saxonne de « Life cycle Costs » ou LCC.

D'autre part il y a un certain nombre de coûts que nous ne pourrions pas prendre en compte par manque de données ou d'informations:

- Impact sur l'environnement;
- Impacts commerciaux;
- Dommages corporels;
- Impacts juridiques;

2.5.2. Coût de la politique de maintenance : $C_{p.m}$

Il est égal au rapport de la somme des coûts directs de maintenance et des impacts sur la production (se traduisant en termes de manque à gagner et de perte de production) sur la somme de la moyenne des temps de fonctionnement et de réparation. (On néglige parfois la MTTR faible par rapport au MTBF).

$$C_{pm} = \frac{C_d + C_{ind}}{MTBF + MTTR} \quad (2.5)$$

Toute politique de maintenance mise en œuvre entraîne un certain coût et une réponse de l'équipement de production en termes de fiabilité et disponibilité résultant de son utilisation.

Hypothèses sur MTBF et MTTR

Pour effectuer l'évaluation sur le coût de la politique de maintenance, nous posons des hypothèses suivantes relatives aux lois de probabilités modélisant la moyenne des temps de bon fonctionnement et de réparation.

Les temps de bon fonctionnement et de réparation d'un équipement de production sont proportionnelles à une période de temps considérés.

Les constantes de proportionnalité λ et μ , qui correspondent au taux de défaillance du matériel en fonctionnement et de réparation sont égales chacune en ce qui la concerne lorsque les temps de défaillance et de réparation sont supposés constants à :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \text{ et } \mu = \frac{1}{MTTR} \quad (2.7)$$

Les moyennes des temps de bon fonctionnement et de réparation sont ainsi modélisées par la loi exponentielle car les temps entre défaillances et réparation suivent une loi exponentielle.

Le taux de défaillance est égal au nombre total de défaillances observés, divisé par le cumul des temps de fonctionnement.

Et le taux de réparation est égal au nombre total de réparation observé, divisé par le cumul des temps de réparation.

$$\begin{aligned} MTBF &= \frac{T}{n} \\ MTTR &= \frac{t}{r} \end{aligned} \quad (2.8)$$

C'est à dire que la moyenne des temps de bon fonctionnement est égale au cumul des temps de fonctionnement, divisé par le nombre total de défaillances observés.

Et la moyenne des temps de réparation est égale au cumul des temps de réparation, divisé par le nombre total de réparation.

En dehors de la loi exponentielle, il existe bien la loi de Weibull et la loi normale qui peuvent bien caractériser le taux de défaillance et de réparation. La loi exponentielle bien sûr n'est pas trop représentative dans l'évaluation concernant le taux de défaillance et de réparation, mais, elle simplifie au maximum les calculs. Elle donne des indications par rapport à ces taux de défaillance λ et de réparation μ .

2.5.3 Coûts directs de maintenance : C_d

Ils sont extraits de la comptabilité analytique de l'entreprise. Ce sont les coûts de main d'œuvre, le coût des matières et fournitures utilisés, les dépenses d'énergie, etc..

Il est important de souligner que les coûts de la main d'œuvre sont difficiles à évaluer car, un opérateur s'occupe de plusieurs équipements à la fois. De plus, nous ne pouvons connaître quelle proportion de temps il passe sur chacun des équipements. Par conséquent nous supposons une valeur raisonnable.

Les autres coûts ne sont pas chiffrables car au niveau de la comptabilité analytique, ils sont regroupés pour tout l'atelier, suivant leur nature (énergie électrique, eau, air comprimé, huiles, fournitures, outils de maintenance etc..).

2.5.4 Coûts indirects de maintenance : C_{ind}

Les coûts de perte de production ou manque à gagner, sont calculés à partir des rebuts imputables aux pannes de l'équipement.

2.5.5 Coûts de remise en marche : $C_{r.m}$

Ce sont des coûts qui sont estimés après réparation due à une défaillance du matériel. Ils sont caractérisés par le temps qui s'écoule entre la fin de la réparation et la reprise du fonctionnement de l'outil de production en régime nominal.

Nous l'exprimons par:

$$C_{rm} = C_{h2} \cdot h \quad (2.9)$$

h : durée de reprise de fonctionnement de l'équipement en régime nominal.

Les coûts de remise en marche s'expriment avec la même expression (2.9) qu'il s'agisse de la remise en marche après dégradation qu'après défaillance avec arrêt de l'équipement de production.

L'obtention de ces différentes conséquences économiques permet d'aborder le processus de prise de décision.

2.6 CONCLUSION

Le présent chapitre, nous a permis d'exprimer quelques notions de la maintenance industrielle telle que les types de maintenance, les différents types de conséquences sur le fonctionnement et les couts de la maintenance.

Comme toute activité industrielle , la maintenance évolue et il ne peut donc pas avoir une seule et unique pratique de la maintenance , la politique de maintenance a pour objectif première de porter l'outil de production à son meilleur potentiel de disponibilité et ce, au cout minimal.

3.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons les principales caractéristiques des systèmes mécaniques ayant un effet direct sur l'évaluation de leur fiabilité et disponibilité. Après, nous passons en revue les principales méthodes d'évaluation de la fiabilité et la disponibilité des installations.

Dans notre cas, l'estimation de ces indices se fait sur les bases de données statistiques tirées de l'historique des heures exploitation et de réparation de la station d'AinNaga ainsi que le système d'étanchéité différentielle turbocompresseurs de la ligne Hassi Ramel - Skikda

Ensuite en fait une application pour l'évaluation de la disponibilité et la fiabilité des stations de compression en utilisant la théorie des chaînes de Markov

3.2 FIABILITE

3.2.1. Intérêts de la fiabilité en mécanique

Les évaluations fiabilistes des systèmes mécaniques reposent sur de nombreux paramètres en premiers lieux les taux de défaillances. Par défaut, des bases de données de fiabilité sont communément utilisées. Pour la plupart, ce sont des recueils de données : OREDA, EIREDA, NPRD, RAC, PDS Data Handbook et bien d'autres, issus des retours d'expérience de secteurs d'activité variés [38].

Les utilisateurs potentiels de celles-ci, se basent sur le fait que leurs matériels sont sensiblement similaires et que les données de fiabilité de ces bases peuvent être transposées à leurs préoccupations. Or on constate que les données de fiabilité des systèmes étudiés ne sont pas homogènes, comme le laissent supposer les variations parfois non négligeables des taux de défaillance entre les bases.

Les causes sont nombreuses :

- Les matériels ont des caractéristiques qui leur sont propres. Un même type des systèmes se décline sous de nombreux équipements dont la fiabilité est différente ;
- Les conditions d'utilisation et l'environnement de fonctionnement varient entre les systèmes. La fiabilité des matériels mécaniques est sensible aux taux de charge, aux modes de fonctionnement, aux sollicitations, aux modes de défaillance pris en considération, aux politiques de maintenance... Ces différences sont accentuées entre les secteurs d'activité ;
- Faire la synthèse des données recueillies pour chaque type de système, nécessite souvent de regrouper sans distinction des matériels aux propriétés intrinsèques et extrinsèques variées, sans distinction de caractéristiques. L'utilisation de ces bases comme données d'entrées des évaluations

de fiabilité entraîne par conséquent de grandes incertitudes quant à la pertinence des résultats.

Le second point qu'il convient de noter est que toutes les bases de données exposées ci-dessus ne fournissent que des taux de défaillance constants. Toutefois, les mécanismes de dégradations des composants mécaniques comme par exemple la fatigue, les vibrations, la corrosion et autres sollicitation créent des phénomènes d'usure et par conséquent le système vieillit. A cela on peut ajouter une période de rodage qui provoque généralement des défaillances chez les jeunes systèmes. Tout cela amène les taux de défaillance des systèmes mécaniques à dépendre du temps. Bien qu'elles y fassent allusion (OREDA, 2002), les bases de données n'incluent pas la variable temps.

L'analyse de la fiabilité constitue une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement. La fiabilité est devenue un paramètre clé de la qualité et d'aide à la décision, dans l'étude de la plupart des composants, Transport, énergie, bâtiments, composants électroniques, composants mécaniques....

De nombreux industriels travaillent à l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité de leurs produits au cours de leur cycle de développement, de la conception à la mise en service (conception, fabrication et exploitation) afin de développer leurs connaissances sur le rapport Coût/Fiabilité et maîtriser les sources de défaillance.

L'analyse de la fiabilité dans le domaine de la mécanique est un outil très important pour qualifier un nouveau produit et améliorer ses performances tout au long de sa mission.

En mécanique, l'analyse de la fiabilité conduit aux questions suivantes :

- Quels sont les composants qui provoquent la panne du système mécanique ?
- Quelles est l'influence des paramètres d'exploitation, sur la performance du système ?
- Comment optimiser l'utilisation du matériel ?

3.2.2. Principales caractéristiques de la fiabilité

3.2.2.1. Fonction fiabilité ou fonction de survie

La fiabilité est la probabilité pour qu'un appareil remplisse une fonction donnée sans défaillance pendant un temps donné dans des conditions d'emploi et d'environnement données. Nous la désignerons par $R(t)$.

La fiabilité d'un système est la probabilité que le temps de fonctionnement sans défaillance sera plus grand que la période t donnée

$$R(t) = P\{t_f > t\} = 1 - P(t_f \leq t) = 1 - F(t) \quad (3.1)$$

$F(t)$ est la fonction de répartition de la variable t . représente la probabilité de défaillance

3.2.3 Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité

3.2.3.1 La loi exponentielle

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. C'est une loi simple, très utilisée en fiabilité dont le taux de défaillance est constant. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales [39]. Les propriétés principales de la distribution exponentielle sont :

Désignation	Formules
Densité de probabilité	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$
Fonction de répartition	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$
Fiabilité	$R(t) = e^{-\lambda t}$
Taux de défaillance	$\lambda(t) = \lambda = c^{te}$
Espérance	$E(t) = 1/\lambda$
Variance	$\sigma^2 = 1/\lambda^2$
Ecart type	$\sigma = 1/\lambda$

Tableau 3.1 Principales propriétés de la distribution exponentielle

3.2.3.2. La loi normale (Laplace-Gauss)

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

Densité de probabilité	Fonction de répartition	Fiabilité	Taux de défaillance
$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$	$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$	$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^\infty e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$	$\lambda(t) = \frac{e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\int_t^\infty e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx}$
$f(t) = \frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$	$F(t) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$	$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$	$\lambda(t) = \frac{1}{\sigma} \frac{\phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)}{\phi\left(\frac{\mu-t}{\sigma}\right)}$

Tableau 3.2. Principales propriétés de la distribution normale

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

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

$$\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}} \quad (3.2)$$

Fonction de répartition :

$$\Phi(u) = \int_0^u \varphi(x) dx \quad (3.3)$$

3.2.3.3. La loi de Weibull

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

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

β : Paramètre de forme ($\beta > 0$);

η : Paramètre d'échelle ($\eta > 0$) ;

γ : Paramètre de position ($\gamma \geq 0$) ;

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

Tableau 3.3. Principales propriétés de la loi de weibull

Suivant les valeurs de β , le taux de défaillance est soit décroissant ($\beta < 1$) soit constant ($\beta = 1$), soit croissant ($\beta > 1$). La distribution de Weibull permet donc de représenter les trois périodes de la vie d'un dispositif décrites par la courbe en baignoire.(fig: 3.2)

Le cas $\gamma > 0$ correspond à des dispositifs dont la probabilité de défaillance est nulle jusqu'à un certain âge γ .

Le cas $\gamma < 0$ est non définie

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

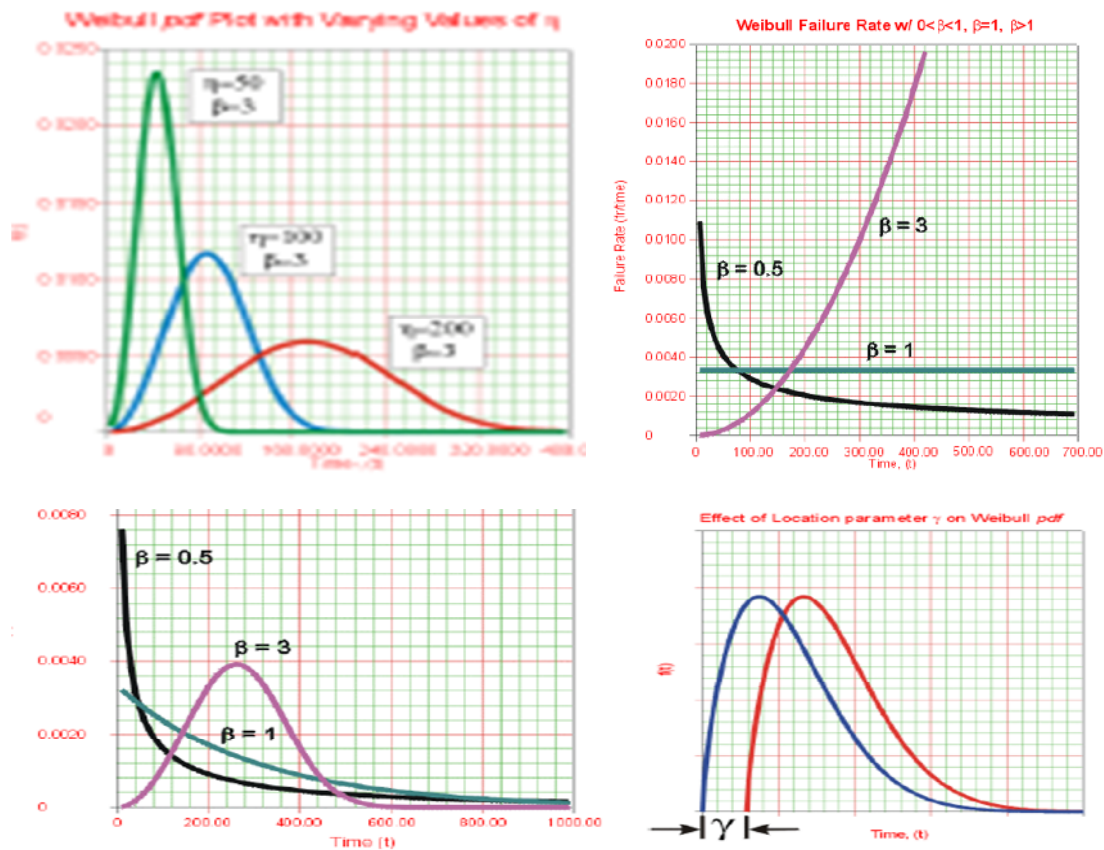


Figure 3.1. Courbes de la distribution de Weibull

3.2.3.4 La loi Log-normale (ou de Galton)

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 :

Fiabilité	Densité de probabilité	Taux de défaillance
$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)$	$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2}$	$\lambda(t) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2}}{t \int_0^{\infty} \sigma\sqrt{2\pi} f(x)dx}$

Tableau 3.4. Principales propriétés de la distribution log-normale

3.2.3.5 La loi Gamma

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

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

Sa densité de probabilité s'écrit :

Densité de probabilité	Taux de défaillance
$f(t) = \frac{\beta^\alpha \cdot t^{\alpha-1} e^{-\beta t}}{\Gamma(\alpha)} \quad \alpha \geq 0, \text{ et } \beta \geq 0$	$\lambda(t) = \frac{\beta^\alpha \cdot t^{\alpha-1} e^{-\beta t}}{\int_t^\infty \Gamma(\alpha) f(u) du}$ avec $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty e^{-x} X^{\alpha-1} dx$

Tableau 3.5. Principales propriétés de la distribution Gamma

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

3.2.3.6 La loi uniforme

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

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{a} & \text{si } 0 \leq t \leq a \\ 0 & \text{si } t > a \end{cases} \quad (3.4)$$

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

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{si } a \leq t \leq b \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.5)$$

3.2.3.7 La loi du Khi-deux

La loi du Khi-deux, ou loi de Pearson, ne sert pas à modéliser directement la fiabilité, mais essentiellement au calcul des limites de confiance lors des estimations par intervalle de confiance. Elle est caractérisée par un paramètre positif v appelé degrés de liberté et n'est définie que pour des valeurs positives.

La densité de probabilité d'une loi de Khi-deux à v degrés s'écrit :

$$f(t) = \frac{1}{2^{\frac{v}{2}} \Gamma(\frac{v}{2})} t^{\frac{v}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}} \quad t \geq 0 \quad (3.6)$$

La loi du Khi-deux est décrite par une table statistique.

3.2.3.8 Loi de distribution combinée

Dans beaucoup d'équipements on peut observer le phénomène suivant [26] :

L'ensemble de la machine est en période de vieillesse alors que certains des éléments ou sous ensembles continuent d'avoir des comportements exponentiels. En considérant que ces 2 types de pannes (usure et aléatoire) sont indépendants on peut écrire pour l'intensité de pannes de l'ensemble:

$$\lambda = \lambda_{\text{aléatoire}} + \lambda_{\text{usure}} \quad (3.7)$$

Où $\lambda_{\text{aléatoire}}$, λ_{usure} - intensité de pannes due à des pannes aléatoires et d'usure;

La probabilité de non défaillance de l'ensemble serait celle où il n'y aurait ni pannes aléatoires, ni pannes d'usure.

$$R(t) = R_{\text{al}}(t) \cdot R_{\text{us}}(t) \quad (3.8)$$

(Seulement pour les systèmes en série)

Les pannes aléatoires suivent une loi de distribution exponentielle, les pannes graduelles suivent une loi de distribution normale.

$$R_{\text{al}}(t) = e^{-\lambda_{\text{al}} \cdot t} \quad (3.9)$$

$$R_{\text{us}}(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t - \text{MTBF})^2}{2\sigma^2}} \cdot dt \quad \text{Alors:} \quad R(t) = \frac{e^{-\lambda_{\text{al}} \cdot t}}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t - \text{MTBF})^2}{2\sigma^2}} \cdot dt \quad (3.10)$$

$$\text{et} \quad \lambda(t) = \lambda_{\text{al}} + \frac{e^{-\frac{(t - \text{MTBF})^2}{2\sigma^2}}}{\int_t^{\infty} e^{-\frac{(t - \text{MTBF})^2}{2\sigma^2}} \cdot dt} \quad (3.11)$$

La densité de probabilité s'écrit:

$$F(t) = \lambda(t) \cdot R(t)$$

$$= \frac{\lambda_{al} \cdot e^{-\lambda_{al} \cdot t}}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t - MTBF)^2}{2\sigma^2}} \cdot dt + e^{-\lambda_{al} \cdot t} \cdot \frac{e^{-\frac{(t - MTBF)^2}{2\sigma^2}}}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \quad (3.12)$$

En intégrant de 0 à ∞ l'expression $R(t)$ on obtient la formule approximative de l'espérance mathématique pour cette loi.

$$M(t) = \frac{1}{\lambda_{al}} \left(1 - e^{-\lambda_{al} \cdot MTBF + \frac{\lambda_{al} \cdot \sigma^2}{2}} \right) \quad (3.13)$$

C'est la durée moyenne de fonctionnement entre les pannes pour cette loi de mélange.

3.2.3.9 La loi de Birnbaum – Saunders

Pour caractériser des défaillances dues à la propagation de fissure par fatigue, Birnbaum et Saunders (1969) ont proposé une distribution de vie basée sur deux paramètres, [12-41]. Cette distribution, pour une variable aléatoire non négative T , est obtenue en tenant compte des caractéristiques de base du processus de fatigue. La variable aléatoire T représente les instants de défaillance.

La densité de probabilité d'une loi Birnbaum et Saunders de paramètres $\alpha\Delta t$ et $\beta\Delta t$ est donnée par la formule :

$$f(t) = \frac{1}{\beta t^2 \alpha^2 2\sqrt{2\pi}} \frac{t^2 - \beta^2}{\left[\frac{t}{\beta}\right]^{1/2} - \left[\frac{\beta}{t}\right]^{1/2}} e^{\left[\frac{1}{2\alpha^2} \left(\frac{t}{\beta} + \frac{\beta}{t} - 2\right)\right]} \quad (3.14)$$

Avec $t \geq 0$, $\alpha \geq 0$ et $\beta \geq 0$

La fonction de fiabilité est donnée par la formule:

$$R(t) = 1 - \Phi \left\{ \frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{t}{\beta} \right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{\beta}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad \alpha \geq 0 \text{ et } \beta \geq 0 \quad (3.15)$$

Où $\Phi(t)$ est la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite.

$$F(t) = \Phi \left(\frac{1}{\alpha} \xi \left(\frac{1}{\beta} \right) \right) \quad t > 0, \alpha > 0 \text{ et } \beta > 0 \quad (3.16)$$

$$\xi(t) = \sqrt{t} - \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (3.17)$$

3.2.4. Spécificité de la fiabilité en mécanique

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

L'évolution du taux de défaillance d'un produit pendant toute sa durée de vie est caractérisée par ce qu'on appelle en analyse de fiabilité la courbe en baignoire. (Figure 3.2)

Le taux de défaillance est élevé au début de la vie du dispositif. Ensuite, il diminue assez rapidement avec le temps (taux de défaillance décroissant), cette phase de vie est appelée période de jeunesse. Après, il se stabilise à une valeur qu'on souhaite aussi basse que possible pendant une période appelée période de vie utile (taux de défaillance constant). A la fin, il remonte lorsque l'usure et le vieillissement font sentir leurs effets, c'est la période de vieillissement (taux de défaillance croissant) [39]

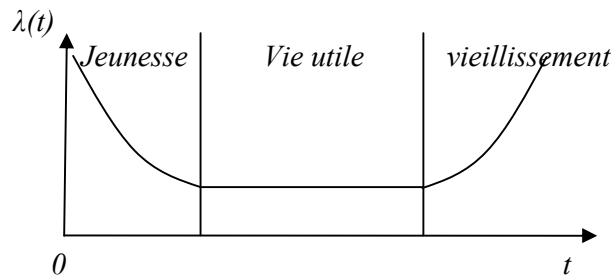


Figure 3.2. Courbe en baignoire pour les composants électroniques

3.2.4.2. Taux de défaillance pour des composants mécaniques

Les composants mécaniques sont soumis, dès le début de leur vie, au phénomène d'usure ou de vieillissement. Si on trace la courbe du taux de défaillance, en fonction du temps, on obtient une courbe qui ne présente pas le plateau de la figure 3.3; la période de vie utile (taux de défaillance constant) n'existe pas ou elle est réduite. Le taux de défaillance du dispositif est une fonction non linéaire du temps et ceci dans chaque phase de sa vie (voir figure 3.2), [41-42].

La première phase définit la période de *mortalité infantile*. C'est une durée de vie en principe très courte. Elle est décrite par une décroissance progressive du taux de défaillance avec le temps dû à une amélioration des caractéristiques internes (caractéristiques de défauts) et des interfaces, par un rodage préalable des pièces. Par conséquent il n'est pas souhaitable de tester les composants mécaniques dans cette période de leur vie [43].

La dernière phase définit la période de vieillissement qui comporte la majorité de la vie du dispositif. Elle est caractérisée par une augmentation progressive du taux de défaillance.

Les pièces mécaniques sont soumises à des phénomènes de vieillissement multiples qui peuvent agir en combinaison: corrosion, usure, déformation, fatigue, et finalement perte de résilience ou fragilisation.

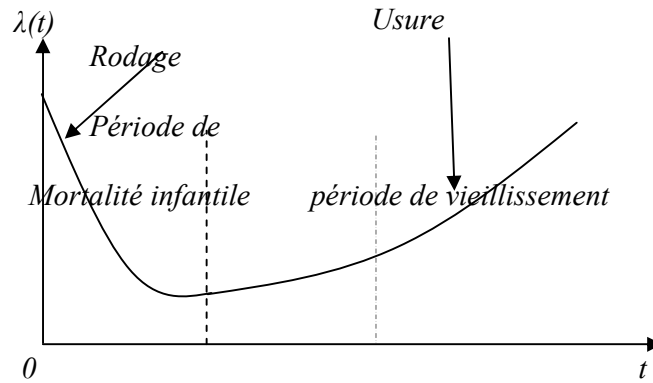


Figure 3.3. La courbe du taux de défaillance en mécanique

Contrairement aux composants électroniques [44] les calculs de la fiabilité pour des composants mécaniques se font essentiellement dans la période de vieillissement, en utilisant des lois de probabilité dont le taux de défaillance est fonction du temps telles que la loi Log-normale, Weibull, etc.

Fonctions Principales	Formules pour la détermination des autres fonctions			
	$R(t)$	$F(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$R(t)$	–	$1 - R(t)$	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$-\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$
$F(t)$	$1 - F(t)$	–	$\frac{dF(t)}{dt}$	$\frac{1}{1 - F(t)} \cdot \frac{dF(t)}{dt}$
$f(t)$	$\int_t^\infty f(x).dx$	$\int_0^t f(x).dx$	–	$\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(x).dx}$
$\lambda(t)$	$e^{-\int_0^t \lambda(x).dx}$	$1 - e^{-\int_0^t \lambda(x).dx}$	$\lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(x).dx}$	–
$M(t)$	$\int_0^\infty R(x).dx$	–	$\int_0^\infty x.f(x).dx$	–

Tableau 3.6. Formules des indices de fiabilité

3.2.5 Analyse des modes de panne - arbres des causes

La norme X60-510 ou CEI812 définit la procédure d'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité ((AMDE - AMDEC ou FMEA - FMECA, *Failure Mode Effect and Criticality Analysis*)).

C'est une méthode qualitative d'analyse de la fiabilité d'une entité, qui consiste à étudier les modes de panne pour chaque sous-entité et à déterminer les effets de ces modes sur les autres sous-entités et sur les fonctions requises de l'entité, complétée éventuellement par une analyse de leur probabilité d'apparition et du degré de leur gravité : mineure, significative, critique, catastrophique.

3.2.5.1. Classification des défaillances en fonction des effets [45]

1. **Défaillance mineure (chiffre 1) :** Défaillance qui nuit au bon fonctionnement d'un système en causant un dommage négligeable au système ou à son environnement sans toutefois présenter de risque pour l'homme.
2. **Défaillance significative (chiffre 2) :** Défaillance qui nuit au bon fonctionnement d'un système sans toutefois causer de dommage notable, ni présenter de risque important pour l'homme.
3. **Défaillance critique (chiffre 3):** Défaillance qui entraîne la perte d'une(ou des) fonction(s) essentielles d'un système et cause des dommages importants au système ou à son environnement en ne présentant, toutefois, qu'un risque négligeable de mort ou de blessure.
4. **Défaillance catastrophique (chiffre 4):** Défaillance qui occasionne la perte d'une (ou des) fonction(s) essentielle(s) d'un système en causant des dommages importants au système ou à son environnement et/ou entraîne, pour l'homme, la mort ou des dommages corporels.

Partant des caractéristiques fondamentales des défaillances des éléments et de la structure fonctionnelle du système, l'AMDE permet de dégager la relation qui existe entre les défaillances des éléments, les contraintes opérationnelles et les défaillances, les dysfonctionnements, la dégradation du fonctionnement du système. Elle prend aussi en compte les problèmes de détection, de diagnostic et les moyens mis en œuvre pour y faire face. Un mode de panne précise le type de panne observée. Les modes les plus généraux sont :

- Fonctionnement prématuré
- Ne fonctionne pas au moment prévu
- Ne s'arrête pas au moment prévu
- Défaillance en fonctionnement

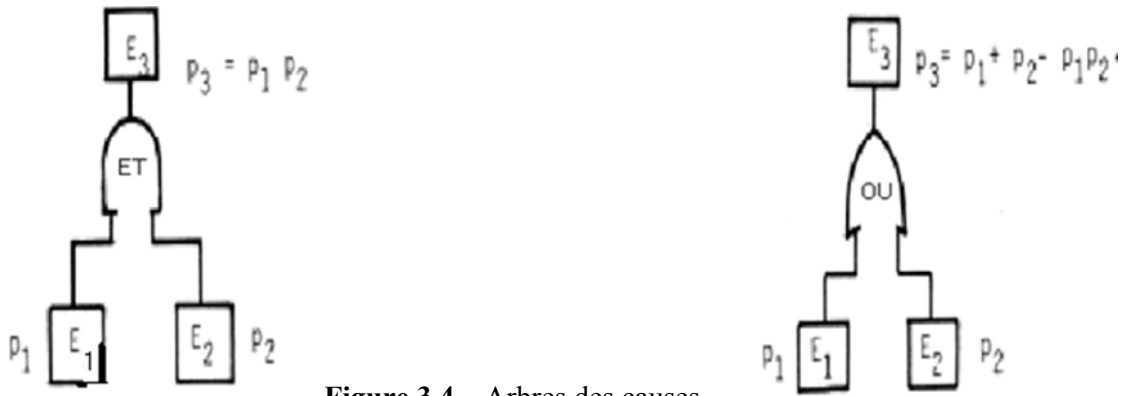


Figure 3.4 – Arbres des causes.

E_3 : Evénement Redouté

$E_1 E_2$: événements secondaires

E_1 : Evenement A ; E_2 : Evenement B ; E_3 : Evenement D

P_i : Probabilité d'occurrence E_i ; P_3 : Probabilité d'occurrence de l'événement Redouté E_3

Pour pouvoir étudier les défaillances secondes il est parfois nécessaire d'examiner la suite chronologique des événements.

L'AMDEC ne concerne, au sens strict, que le matériel mais peut cependant englober les erreurs logicielles et même humaines.

Peu utilisée pendant les phases d'étude, de planification, de définition, elle trouve un large emploi au cours de la conception et de la mise en œuvre.

L'établissement de diagrammes fonctionnels ou de graphes d'état est étroitement lié à l'AMDE. Son utilisation conduit évidemment en aval vers les programmes d'essai, de maintenance, de contrôle qualité mais aussi en amont à optimiser la conception pour réduire les risques de panne critique.

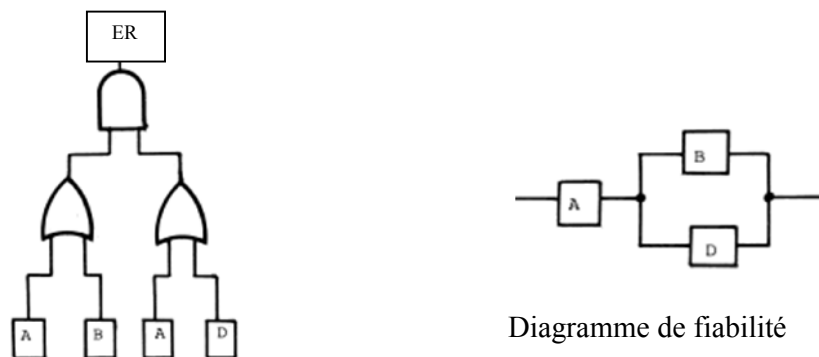


Figure 3.5. Arbre des causes

$$P_{ER} = P_A \cdot (P_B + P_D - P_B \cdot P_D) \quad \text{ou bien} \quad P_4 = P_1 \cdot (P_2 + P_3 - P_2 \cdot P_3)$$

A partir du dossier de définition technique, la procédure nécessite :

- Une définition fonctionnelle du système avec son environnement sous forme de diagrammes fonctionnels précisant pour chaque bloc ses interfaces avec l'extérieur. Les diagrammes de fiabilité précisent les taux de panne,
- L'élaboration de tableaux comportant surtout l'identification du composant, ses modes de défaillance, leurs causes possibles et leurs effets avec éventuellement leur criticité.

Cette masse importante d'information est souvent complétée par :

- **Un arbre des causes**, diagramme logique qui utilise les symboles de la logique combinatoire et relie les pannes des sous-entités ou les événements extérieurs à la panne de l'entité en chiffrant parfois les probabilités.
- Diagrammes de fiabilité et arbres des causes sont équivalents. La quantification s'obtient essentiellement par la méthode des coupes minimales soit sur les diagrammes, soit sur les arbres.
- **Un arbre de diagnostic**, qui décrit la démarche inverse à des fins de maintenance et de diagnostic.

3.2.5.2. Outils d'évaluation de la F.M.D.

La détermination de la fiabilité d'un système électronique, mécanique ou autre nécessite tout d'abord de connaître la loi de la fiabilité (ou la loi de défaillance) de chacun des composants intervenant dans le système ([11-43-46-47],

Ceci est simple pour certains types de systèmes tels que les systèmes électroniques, or ce n'est pas le cas pour des systèmes mécaniques à cause de la complexité de la structure du système étudié. Les systèmes mécaniques sont des ensembles d'éléments technologiques liés par des relations statiques et dynamiques assez complexes.

- a) On découpe l'ensemble en sous-ensembles à l'intérieur desquels tous les éléments sont associés en série et on admet en général que ces éléments ou composants ont un taux de défaillance constant. Le taux de défaillance d'un sous-ensemble est la somme des taux de ses composants, ces taux élémentaires étant tirés du recueil de données de fiabilité en fonction des contraintes de fonctionnement et d'environnement.
- b) Le bilan met en évidence les éléments les moins fiables sur lesquels des efforts particuliers sont nécessaires (réduction des contraintes, changement de technologie). On peut décider d'introduire des sous-ensembles *redondants* ou d'acheter des composants à *fiabilité améliorée*.

- c) La prévision de fiabilité comprend en outre l'étude éventuelle des composants à taux de défaillance *non constant* (en considérant la fonction fiabilité du sous-ensemble) ainsi que la recherche de la *durée de vie utile* de certains composants (électromécaniques), et l'influence des dérives éventuelles .

Enfin, l'étude de l'influence des modes de défaillances des composants sur les modes de panne des sous-ensembles est souvent nécessaire.

Le plus souvent, les systèmes mécaniques sont considérés à configuration série, du fait qu'on a gardé que les composants critiques.

Dans ce cas et lorsque les composants du système sont supposés indépendants, les caractéristiques de fiabilité sont les suivantes :

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

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad \text{et} \quad \lambda_{\text{syst}}(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (3.18)$$

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

3.2.6 Différents cas de situation pour l'évaluation de la fiabilité

L'objectif se rapporte à [45]:

- Réduire le nombre de pannes et des micro-pannes, en faisant les différentes analyses des historiques, provenant de ou des équipements critiques
- Apporter si possible des modifications techniques du matériel de façon à éviter les pannes durables.
- Développer le plan préventif en exploitant les AMDEC.
- Préciser les besoins et des conséquences que ces derniers impliquent sur le plan technique, (social ou économique).

La prise de décision, à chacun des niveaux, implique un processus intellectuel qui prend en compte l'information disponible et son analyse en termes de fiabilité.

La modélisation de la connaissance a priori issue de l'expertise lorsque celle –ci existe se fera grâce à l'utilisation de l'étude de l'AMDEC.

L'analyse fonctionnelle est nécessaire à la compréhension du système. Elle prend en compte la liste des sous-ensembles ou des composants du système étudié, avec leurs fonctions associées.

L'analyse de la défaillance identifie le mode, la cause et l'événement redouté de la défaillance. Bien entendu un mode de défaillance peut avoir plusieurs causes de défaillances

3.2.6.1 L'analyse de la criticité

Permet de mettre en évidence :

- La gravité qui s'évalue à partir des effets par une note estimée de 1 (mineur), à 4 (catastrophique). Suivant les systèmes, la gravité peut s'estimer sur plusieurs critères : sécurité des personnes, des biens, défauts de qualité, perte de disponibilité, pénalisation de la production, etc.
- La Probabilité d'occurrence des causes de défaillance, estimée par consensus des experts du groupe de travail s'évalue par une note estimée 1 (improbable) à 4 très fréquent. Dans le cadre de notre modélisation, nous allons faire correspondre ces indices à des valeurs chiffrées en fonction du taux de défaillance λ exprimé en défaillance/heure suivant le tableau 3.7, et le taux de réparation μ exprimé en réparation/heure que peut retrouver au tableau 3.8.

λ (déf/heure)	$\lambda < 10^{-9}$	$10^{-9} < \lambda < 10^{-6}$	$10^{-6} < \lambda < 10^{-3}$	$\lambda > 10^{-3}$
Indice	1	2	3	4
Appréciation	Improbable	Rare	Fréquent	très fréquent

Tableau 3.7: Correspondance Indice d'occurrence et taux de défaillance

μ (réparation/heure)	$\mu < 0,15$	$0,15 < \mu < 0,3$	$0,3 < \mu < 0,6$	$\mu > 0,6$
Indice	1	2	3	4
Appréciation	Improbable	Rare	Fréquent	très fréquent

Tableau 3.8. Correspondance Indice d'occurrence et taux de réparation (réparation/heure)

Les mesures envisagées permettent de retenir les différentes propositions d'améliorations de fonctionnement:

- Modification de la conception,
- Moyens de détection ou consignes de surveillance ou inspections périodiques,
- Dispositif de remplacement,
- Observations, recommandations.

3.2.7 Recueils de données de la fiabilité des équipements mécaniques

Parmi les problèmes rencontrés lors du calcul prévisionnel de la fiabilité des systèmes mécaniques, les plus fréquents sont la quasi absence de normalisation et de standardisation internationales et l'absence des données de vie sur les composants des systèmes mécaniques. Ceci est principalement dû à la complexité des composants [48]

En électronique, un domaine où le calcul de la fiabilité est pratiqué depuis de nombreuses années, les bases de données de fiabilité sont disponibles et nombreuses. En revanche, en mécanique les recueils de données existants sont moins reconnus qu'en électronique, et moins nombreux mais ils sont tout de même très utilisés surtout ces dernières années.

En pratique, on utilise souvent des bases de données connues, mais il est préférable, quand cela est possible de recueillir les données de retours d'expériences auprès des fabricants des composants que l'on utilise. Cependant, ces données sont difficiles à obtenir pour des composants mécaniques. Les constructeurs ne s'efforcent pas de les collecter systématiquement, du fait qu'il est difficile de trouver une métrique de sûreté de fonctionnement. Dans le cas où elles existeraient, elles sont conservées confidentiellement.

Les recueils de données de fiabilité les plus connus pour des dispositifs mécaniques sont présentés dans le (tableau 3.9) [49]. Dans la majorité des recueils, les données de fiabilité sont fournies sous forme de taux de défaillance constants principalement pour les composants électroniques et sous forme de durées de vie moyennes, valeurs minimales et maximales ou de probabilité de bon fonctionnement, en particulier pour les composants mécaniques Ces recueils sont mis à jour régulièrement pour tenir compte des évolutions technologiques.

3.2.7.1 Données de fiabilité pour des composants mécaniques

Les principales bases de données de fiabilité en mécanique sont présentées dans le tableau suivant (tableau 3.9 [41] , [50])

Source	Titre	Editeur	Dernière version
AVCO	Failure rates	D.R.Earles&M.Eddins AVCO Corporation,USA	<i>Avril 1962</i>
NPRD	Nonelectronic parts reliability data	Reliability Analysis Center,RAC ,New York,USA	NPRD 97 ,1997
NSWC	Handbook of reliability prediction for mechanical equipment	CaderockDivision,Naval Surface Warfare Center United States Navy	NSWC-98/LE1,1998
EIREDA	European reliability industry data handbook	European Commission and Electricité de France CRETE UNIVERTY PRESS	1998
FARADA	Failure rate data	GIDEP-GovernmentIndustry Data Exchange Program (USA)	<i>Mil-STD-1556 B 24 février 1986</i>

Tableau 3.9. Recueils de données de fiabilité en mécanique

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

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

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

L'hypothèse d'une loi exponentielle pour les temps de défaillance n'est pas souvent adoptée car la majorité des composants présentés dans le manuel ont une distribution de durée de vie Weibull ou Log-normale. Le manuel présente des méthodes qui permettent de calculer les paramètres des lois considérées.

NSWC : Le NSWC est un catalogue publié par la Marine des États-Unis (Naval Surface Warfare Center), il fournit des modèles de taux de défaillance, supposés constant, pour des classes fondamentales de composants mécaniques tels que les ressorts, les moteurs, les freins, les embrayages, etc.

Les modèles du taux de défaillance incluent des facteurs pouvant avoir un impact sur la fiabilité des composants. Ces facteurs tiennent compte des modes de défaillance et des paramètres qui les engendrent, par exemple les caractéristiques matériaux, les conditions d'environnement, les forces appliquées, etc. Ces paramètres constituent des données d'entrée pour les modèles de taux de défaillance.

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

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

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

3.2.7.2 Limite d'utilisation des bases de données mécaniques

La comparaison de ces cinq recueils de données de fiabilité pour des composants mécaniques mène à quelques résultats intéressants [51] :

Le NPRD-97 est le plus utilisé, il offre plus d'information nécessaire à une évaluation simple de la fiabilité. Ses données proviennent de l'utilisation réelle des composants, c'est pour cette raison qu'elles sont jugées bonnes, néanmoins elles sont toutes données en nombre de défaillance par million d'heures, ce qui n'est pas une mesure adéquate pour certains équipements (de durées de vie cycliques).

Le **NSWC-98** présente des données plus récentes, comparé aux autres manuels, il peut offrir une alternative plus précise si les données d'entrées sont de plus en plus disponibles.

Le document AVCO contient des données de vie pour des composants utilisés dans des environnements divers. Néanmoins, ces données datent de 1962, or depuis l'évolution des technologies n'a pas cessé d'avancer, en particuliers dans le domaine de la science des matériaux, et la performance des systèmes augmente de plus en plus.

Enfin, le IEEE STD 500 offre des données pour des matériels utilisés dans les centrales nucléaires. Il y a plus de données pour des composants électriques et électroniques que les composants mécaniques.

Ces recueils de données de fiabilité sont fondés soit sur des résultats d'exploitation ou des résultats d'essais en laboratoire. Le processus de dégradation des équipements (modes, mécanismes et causes de défaillance), les conditions d'utilisation et l'évolution des technologies sont des paramètres nécessaires pour le calcul des taux de défaillance et l'élaboration des modèles prévisionnels de la fiabilité, or il est difficile de les prendre tous en considération. Les données sont souvent inappropriées aux systèmes et environnements réels.

Par conséquent, aucune de ces sources de données ne fournit des données parfaites pour une évaluation plus précise de la fiabilité, les informations recueillies ne permettent qu'une exploitation partielle des données, cependant elles restent toujours utiles pour de nouvelles conceptions.

3.2.8 Utilisation de l'inférence bayésienne

Le but ultime de la statistique est de fournir une inférence sur le paramètre recherché, au vu de l'observation liée par une distribution de probabilité [52].

Toute connaissance disponible est capitalisée dans la distribution de probabilité a priori qui exprime l'état de la connaissance ou de l'ignorance sur le composant critique avant l'analyse des données.

Par la suite, les données du retour d'expérience sont intégrés à l'aide du théorème de Bayes au fur et à mesure pour calculer la distribution a posteriori qui permet d'estimer le niveau de connaissance atteint.

A l'itération suivante, la connaissance a posteriori devient la connaissance a priori et ainsi de suite.

La figure 3.5 présente cette inférence.

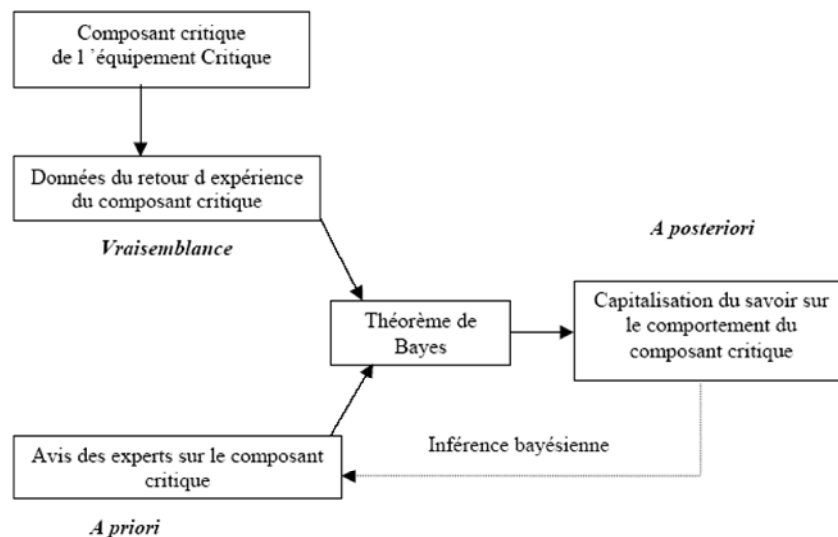


Figure 3.6. Principe de l'inférence bayésienne

L'originalité de cette méthode est qu'elle prend en compte toute information disponible, modélisée sous forme de densité de probabilité, tant pour la distribution statistique des observations que pour celle de l'estimation à priori. La probabilité à posteriori est donc ainsi représentée par une distribution de densité de probabilité où aucune information n'est perdue en théorie, toute forme de distribution peut-être envisagée. L'intégration de cette distribution dans son domaine de variation est une valeur unique correspondant à la probabilité prévisionnelle.

La démarche bayésienne a le mérite de pouvoir s'appliquer aux événements rares qui correspondent aux événements à risques. C'est une probabilité subjective validée en permanence par la statistique inférentielle, c'est à dire la vraisemblance du degré de croyance de l'expert sera conditionnée par le retour d'expérience.

3.2.8.1. Utilisation du nombre et la nature des données du retour d'expérience

Le retour d'expérience vise une meilleure connaissance du comportement d'un équipement de production et ses différents composants, de leurs modes de dégradation, de dysfonctionnement ou d'endommagement. Il est basé sur la collecte et la gestion des faits techniques, observés pendant toute la durée de vie de l'installation, de sa mise en service jusqu'à son démantèlement. Les données à traiter ne sont généralement pas réunies selon un plan d'échantillonnage standard que l'on peut trouver dans toutes les théories de statistique classique : en effet, les données proviennent des installations qui ont été mises en service à des dates et des époques différentes. Dans ce contexte, la constitution d'un échantillon correct de données passe par la reconstitution de l'historique complet d'exploitation de ce matériel, pour une période d'observation déterminée[51].

On se trouvera à la tête d'un échantillon de données de type retour d'expérience qui est un mélange très complexe d'observations dont les caractéristiques sont les suivantes:

- Données rares, éparses, incomplètes;
- Données sur les équipements similaires mais différentes;
- Avis des spécialistes.

L'analyse de fiabilité bayésienne peut être utilisée pour pallier aux manques de données qui est une limite caractéristique d'étude pour les démarches classiques. Cette démarche utilise des données « subjectives » provenant de l'interrogation d'experts. Ceci s'intègre parfaitement dans un processus de prise de décisions en régime d'incertitude. Une inférence c'est à dire la mise à jour de la probabilité de défaillance est ainsi possible lorsqu'on dispose de nouvelles informations.

D'autre part, dans certains cas, on considère des événements extrêmement rares comme la rupture d'une structure pour laquelle on ne dispose d'aucune information relative à la défaillance. L'analyse bayésienne sera utile pour la compréhension du mécanisme de défaillance. Dans les PME/PMI l'expertise est rarement partagée et chaque spécialiste vit dans son cloisonnement. La connaissance de l'exploitation de l'outil de production est capitalisée

dans la tête d'un individu. Les techniques bayésiennes vont donc permettre dans cet environnement d'utiliser toutes formes ou nature des données en quantité comme en qualité.

3.2.8.2. Prise en compte des modifications d'équipement

La prise en compte des modifications des équipements semble indispensable à cause de:

- La vétusté des équipements dont la plupart pour les pays Africains sont acquis au lendemain des indépendances (année 1960 en moyenne).
- Modification de la politique de maintenance pour mieux l'adapter à la réalité quotidienne d'exploitation.

Dans la continuité de l'idée, [53] la démarche bayésienne s'adaptera donc particulièrement à ce contexte qui consiste à actualiser les données issues du retour d'expérience, permettant ainsi les études de tendance ou les analyses de fiabilité.

Dans le cadre bayésien toute modification d'équipement doit être intégré et mis à jour en utilisant les lois de probabilité. Si nous avons observé un événement MD (Modification d'équipement), qui est informatif par rapport à l'événement C (fonctionnement ou arrêt de l'équipement), notre degré de croyance en C se modifiera selon l'équation suivante:

$$P(C/D) = \frac{P(D/C)P(C)}{P(D)} \quad (3.19)$$

Où $P(C/D)$ représente notre degré de croyance en C après la modification MD, lorsque $P(C)$ est notre degré de croyance avant la modification et $P(D/C)$ étant la probabilité conditionnelle des données observées.

3.2.9. Fiabilité des systèmes à taux de défaillance et de réparation constants

L'hypothèse des taux de défaillance et de réparation constants est justifiée pour les systèmes complexes, lorsque l'on étudie la fiabilité et la disponibilité moyenne d'un parc de machines [26].

Dans le cas où les systèmes comportent des pièces dont le taux de défaillance n'est pas constant, la résolution du problème est beaucoup plus complexe

3.2.9.1. Redondance active totale, partielle

Une redondance active est réalisée par la mise en parallèle d'éléments assurant les mêmes fonctions et travaillant en même temps.

3.2.9.1.1. Redondance active totale

Le système ne devient défaillant qu'avec la défaillance du dernier composant survivant.

En désignant par r la fiabilité d'un composant et par n le nombre de composants mis en redondance, on a :

$$R_n = 1 - (1 - r)^n \quad (3.20)$$

Soit:

$$R_n = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} C_n^i . r^i \quad (3.21)$$

Avec

$$C_n^i = \frac{n(n-1)\dots(n-i+1)}{i!} \quad (3.22)$$

On a également (distribution binomiale):

$$R_n = \sum_{i=1}^n C_n^i . r^i (1-r)^{n-i} \quad (3.23)$$

Dans le cas de composants à taux de défaillance constant, on a pour la première mission :

$$\theta_n = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \quad (3.24)$$

3.2.9.1.2. Redondance active partielle

On dispose de n composants, mais il faut, pour que le système fonctionne, que $k \leq n$ composants ne soient pas défaillants ; le système peut donc accepter $(n - k)$ défaillances. Par application de la distribution binomiale, on a :

$$R_{k/n} = \sum_{i=k}^n C_n^i r^i (1-r)^{n-i} = 1 - \sum_{i=0}^{k-1} C_n^i r^i (1-r)^{n-i} \quad (3.25)$$

Dans le cas de composants à taux de défaillance constant, la MTBF pour la première mission est

$$\theta_{k/n} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=k}^n \frac{1}{i} \quad (3.26)$$

3.2.9.2 Redondance séquentielle (ou de stockage)

3.2.9.2.1 Equations générales dans le cas d'un taux de défaillance nul en stockage

Dans le cas de deux composants, soit le composant mis en service initialement remplit la mission, soit il est défaillant au cours de la mission à l'instant $\tau < t$ et est remplacé par le second qui survit jusqu'à la fin de mission.

On a alors, en appelant $R_{S_2}(t)$ la fiabilité du système, $R(t)$ la fiabilité d'un composant et $f(t)$ la densité de probabilité :

$$R_{S_2}(t) = R(t) + \int_0^t f(\tau).R(t-\tau).d\tau \quad (3.27)$$

Avec $0 < \tau < t$.

3.2.9.2.2. Equations générales dans le cas d'un taux de défaillance non nul en stockage

Dans le cas de 2 composants, soit le composant mis en service initialement remplit la mission, soit il est défaillant au cours de la mission et est remplacé par le second, qui n'est pas tombé en panne pendant le stockage, et qui survit jusqu'à la fin de la mission.

En appelant $R_{S_2}(t)$ la fiabilité du système, $R_0(t)$ et $f_0(t)$ la fiabilité et la densité de probabilité en stockage du composant, $R_1(t)$ et $f_1(t)$ la fiabilité et la densité de probabilité en service du composant, on a :

$$R_{S_2}(t) = R_1(t) + \int_0^t f_1(\tau).R_0(\tau).R_1(t-\tau).d\tau \quad (3.28)$$

3.3. MAINTENABILITÉ

3.3.1. Définition

La maintenabilité est une caractéristique précisant la facilité et la rapidité avec lesquelles un système peut être remis en un état de fonctionnement total avec une fiabilité correspondant à son âge. La rapidité de remise en état d'un système peut être mesurée par la durée active du dépannage. Par active, on entend qu'on ne comptera pas les temps morts non imputables à la conception du système, tels que les délais de réponse des dépanneurs, les durées d'attente des pièces de rechange ou les temps passés à la rédaction des pièces administratives, car ces temps dépendent de l'organisation et de l'efficacité du service de maintenance et non de la conception du système.

La durée de maintenance active, qui concerne la maintenabilité comme la durée de maintenance totale incluant les temps morts, est très variable en fonction de la panne, de l'aptitude du dépanneur et des moyens d'aide dont il dispose.

Ce sont des variables aléatoires caractérisées par une densité de probabilité et une fonction de répartition appelée fonction maintenabilité. Il en résulte que la maintenabilité peut être mesurée par une probabilité, d'où une définition possible :

''La maintenabilité est une caractéristique d'un système mesurée par la probabilité d'être remis, par une action de maintenance, dans des conditions opérationnelles définies, dans une durée fixée, les ressources et les conditions d'environnement étant préalablement spécifiées ''.

On utilise souvent le terme de temps de réparation, alors qu'en réalité, on s'intéresse à un intervalle de temps, donc à une durée.

De même, le terme de réparation ne concerne que la maintenance corrective, alors qu'il faut également considérer la maintenance préventive dans les études de maintenabilité.

3.3.2 Principales lois de probabilité utilisées en maintenabilité :

Les Principales lois de probabilité utilisées en maintenabilité sont représentées dans le tableau 3.10

Distribution log-normale

La distribution log-normale représente assez bien les durées de maintenance, avec un taux de maintenance croissant au départ, puis passant par un maximum. Elle est caractérisée par le fait que le logarithme des durées suit une loi normale.

Malgré ses avantages de représentativité, elle est d'une utilisation difficile, en particulier pour les systèmes redondants (avec réserve).

Si l'on désigne par $\varphi(u)$ la distribution normale réduite et par $\Phi(u)$ la fonction de répartition correspondante, et que l'on fait la transformation $u = (\ln t - m)/s$, où m et s sont les deux paramètres de la loi log-normale, on obtient les différents paramètres de la loi représentée au tableau (3.10)

Distribution Gamma entière ou d'Erlang.

Lorsque la durée de maintenance peut être considérée comme la somme de k durées élémentaires distribuées exponentiellement avec une même moyenne $1/\lambda$, elle peut être représentée par une distribution Gamma entière d'ordre k .

Chapitre 3 Fiabilité, Maintenabilité Et Disponibilité En Mécanique

Distribution	Exponentielle	Normale	Log-normale	Gamma ou Erlang
Distribution de probabilité : $g(t)$	$g(t) = \mu e^{-\mu t}$	$g(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{t-MTTR}{\sigma}\right)^2}$	$g(t) = \varphi(u)/t.s$	$g(t) = \frac{\lambda}{(k-1)!} (\lambda t)^{k-1} e^{(-\lambda t)}$
Fonction maintenabilité : $M(t)$	$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$	$M(t) = \Phi(u)$	$M(t) = \Phi(u)$	$M(t) = 1 - e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!}$
Durée moyenne de maintenance (MTTR),	$MTTR = \frac{1}{\mu}$ $MTTR = \frac{1}{n} \sum TTR_i$	$MTTR = m$ $MTTR = \frac{1}{n} \sum TTR_i$	$\hat{\tau} = e^{(m + \frac{s^2}{2})}$ $\hat{m} = \sum_{i=1}^n \ln t_i / n$	$\tau = k / \lambda$
Durée maximale de réparation pour une probabilité α : $TTR(max)$	$TTR_{max} = -\tau \ln(1 - \alpha)$ Avec $\alpha = 0,95$ ou $\alpha = 0,90$ probabilité	$T_{max} = \mu + 1,65 \sigma$ pour 95% $T_{max} = \mu + 1,28 \sigma$ pour 90%	$T_{max} = \exp(m + 1,65s)$ pour 95 % $T_{max} = \exp(m + 1,28s)$ pour 90 % $S = \frac{\ln(T_{max}/T_{med})}{1,65}$ pour 95% $S = \frac{\ln(T_{max}/T_{med})}{1,28}$ pour 90%	
l'écart-type		$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (t-m)^2}$	$\hat{s} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\ln t_i - m)^2}{n-1}}$	
Taux de maintenance			$\mu(t) = \frac{\varphi(u)}{ts[1-\varphi(u)]} = \frac{z(u)}{ts}$ $z(u)$ taux de maintenance de la loi normale réduite.	$\mu(t) = \frac{(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)! \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!}}$
Durée médiane			$T_{med} = \exp(m)$	
Variable réduite de distribution		$u = (t - MTTR)/\sigma$ $\phi(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{u^2}{2}\right)} = \sigma.g(t)$		

Tableau 3.10 Principales lois de la maintenabilité

3.4 LA DISPONIBILITE

3.4.1. Définition

Aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné [51], en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée. Les moyens autres que la logistique de maintenance (personnel, documentation, rechanges, etc....) n'affectent pas la disponibilité d'un bien.

- la disponibilité instantanée prévisionnelle (définie précédemment)
- la disponibilité moyenne : moyenne sur un intervalle de temps donné $[t_1, t_2]$ de la disponibilité instantanée prévisionnelle, ou mesurée en phase opérationnelle par la durée de fonctionnement effectif divisée par la durée donnée.

3.4.2 Définition probabiliste

La disponibilité $A(t)$ représente la probabilité pour que le système S soit non défaillant à l'instant t . On remarquera que dans le cas de systèmes non réparables, la définition de la disponibilité est équivalente à celle de la fiabilité :

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

L'aptitude contraire est appelée indisponibilité, et est définie par : $\tilde{A}(t) = 1 - A(t)$

La disponibilité dépend de la fiabilité et de la maintenance, suivant la relation :

$$A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad \text{si } t \rightarrow 0 \quad (3.29)$$

Augmenter la disponibilité d'un matériel consiste à réduire le nombre de ses arrêts (Fiabilité) et à réduire le temps mis pour les résoudre (Maintenabilité).

Sur leur cycle de vie, les caractéristiques SDF les plus pertinentes sont l'indisponibilité et le taux de défaillance élémentaire.

La première s'exprime – ponctuellement – par la probabilité pour que le système considéré soit inapte à l'utilisation (malgré la redondance éventuelle et les réparations), ou bien – après stabilisation du régime transitoire – par le temps moyen après lequel le matériel n'est plus utilisable (entre défaillance et remise en service).

Le second rend compte de la fréquence des défaillances, qui devient vite constante et permet – de préférence à la fiabilité – de dimensionner la logistique de soutien.

Mais c'est la modélisation même du processus de fonctionnement et de maintenance curative qui rend compte du cycle de vie du système et permet les calculs des probabilités d'état ou de ses estimateurs.

Un dispositif (composant, système, sous-système, ...) peut être à un instant fixé : Opérationnel ; Défaillant. On représente l'état d'un dispositif par une variable aléatoire binaire X , avec

$X = (1 \text{ si le dispositif est opérationnel})$

$= (0 \text{ si le dispositif est défaillant})$

La *disponibilité* du dispositif est définie comme la probabilité qu'il soit opérationnel (à l'instant t considéré) :

$$A(t) = P(X = 1) \quad (3.30)$$

Disponibilité d'un composant à l'instant t , $A(t)$ = probabilité que le composant soit opérationnel, compte tenu de sa fonction de survie et de la loi du temps de réparation.

En général, il existe un régime stationnaire, ζ - à -d :

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} A(t) = A \quad (3.31)$$

En régime stationnaire, disponibilité = intervalle du temps pendant lequel le composant est utilisable.

Pour des taux de défaillance λ et de remise en service μ constants, la théorie des chaînes de Markov nous donne la valeur de la disponibilité stationnaire :

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3.32)$$

1) Bien choisir la disponibilité souhaitée en fonction des besoins et des coûts.

2) Lors d'une panne d'un composant, on a :

Temps d'indisponibilité = Temps de détection de la panne + Temps de réparation (ou de remplacement).

Pour assurer une bonne disponibilité pour un système, il est donc essentiel que tout composant défaillant soit détecté et réparé aussi vite que possible.

3.5 DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DE FIABILITE

(Application aux turbocompresseurs TC située sur le gazoduc HRmel – Skikda).

3.5.1 Détermination des caractéristiques de fiabilité des TAG

Le chronogramme d'une machine en fonctionnement

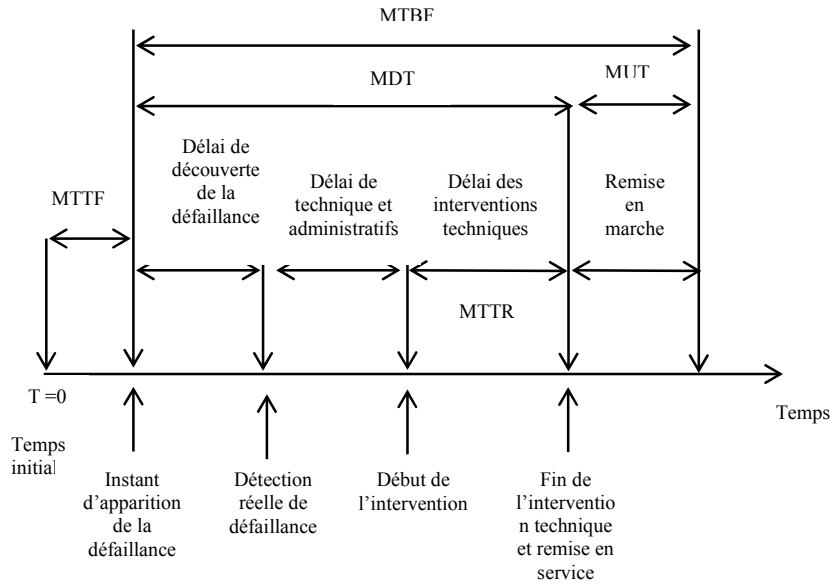


Figure 3.7 Le chronogramme d'une machine en fonctionnement

MTTF – durée moyenne de fonctionnement avant la première panne ;

MTBF - durée moyenne entre deux pannes consécutives ;

MTTR - durée moyenne de réparation effective ;

MUT - durée moyenne de bon fonctionnement après réparation

MDT - durée moyenne d'immobilisation pour réparation (durée de réparation effective + temps perdu pour la préparation de l'opération de réparation + temps de remise en marche).

Indices (heures)	MTTR	MTBF	MUT	MDT
TC ₁	1280	43032	19873	23159
TC ₂	1920	50640	26287	24353

Tableau 3.11. Calcul des indices des TC₁, TC₂

3.5.1.1 Représentation des indices des TC

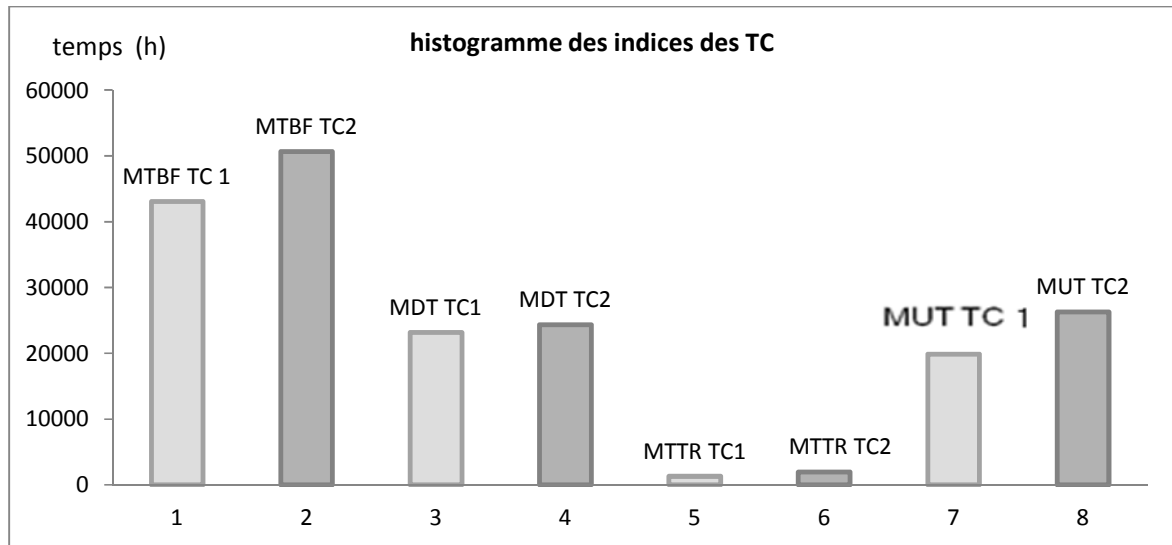


Figure 3.8. Histogramme des indices des TC

3.5.1.2 Résultats de l'étude des paramètres d'exploitation des TAG

1) D'après les résultats obtenues on constate que $MUT_2 > MUT_1$ c-à-d pendant cette période

le TC2 a été utilisée pendant une période de 6414 heures de plus que le TC 1.

2) La différence entre les 2 MDT est relativement faible (1194 heures). Elle est due surtout aux interventions de réparation de révision sur le TC₂.

3) On constate que le $MTTR_2$ est supérieur à $MTTR_1$ de 640 heures due aux interventions de réparation et de révision sur le TC₂.

4) La différence entre les MTBF des 2 TC est de 7608 heures. Elle est due surtout à la différence entre les MUT c'est à dire que le TC₂ a été utilisée beaucoup plus que le TC₁.

- le TC₂ est la plus dégradée parmi les turbines mises en exploitation.
- le TC₁ n'a pratiquement pas fonctionné pendant la période d'observation.
- La cause principale de la dégradation du TC₂ est l'usure.

3.5.1.3 Paramètres de fiabilité

Le traitement des données recueillies sur les stations de compression du gazoduc HassiRmel – Skikda (voir annexe) a permis de calculer les indices suivants de fiabilité des TAG installées :

1) $MTBF = 1719$ heures ;

2) Les histogrammes des fonctions $F(t)$; $R(t)$ et $\lambda(t)$ sont les suivants :

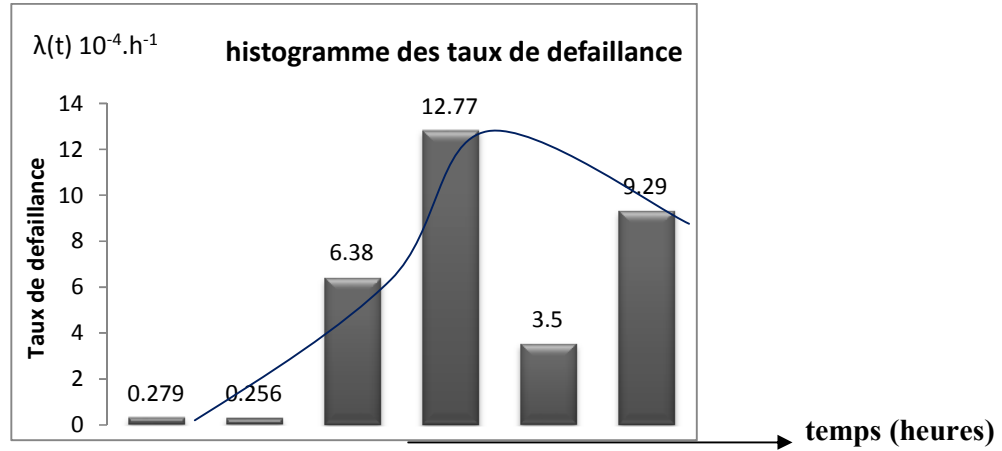


Figure 3.9 Histogramme de la fonction $\lambda(t)$

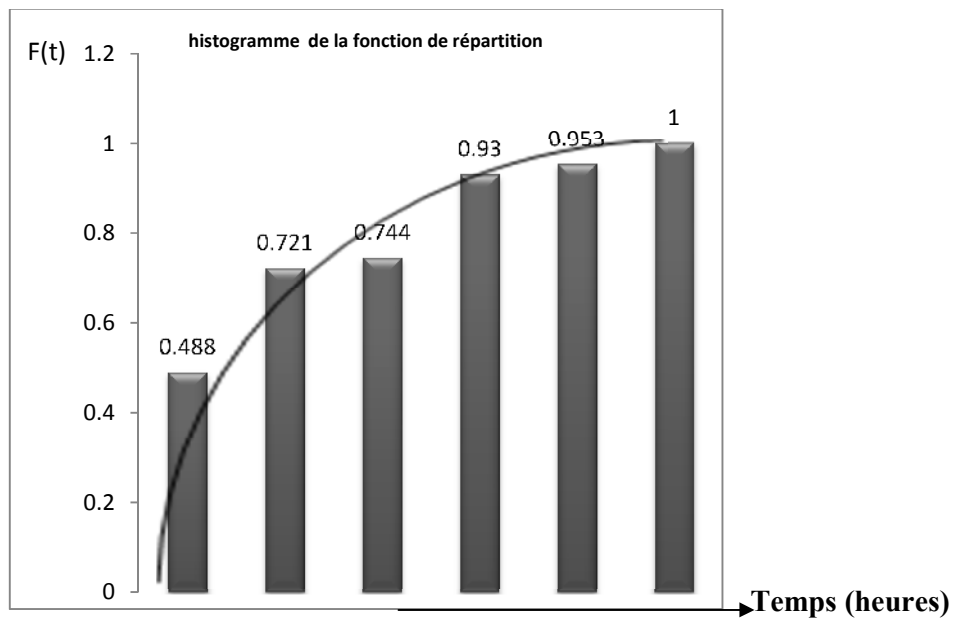


Figure 3.10 Histogramme de la fonction de répartition $F(t)$

3.5.1.4 Interprétation des résultats

D'après les statistiques recueillies les pannes des systèmes d'étanchéité des turbocompresseurs suivent une loi de distribution normale c'est à dire qu'ils sont en période de vieillissement.

- 1) Le MTBF pour ces éléments est égale à 7066 heures. ;
- 2) L'écart quadratique moyen est égale (pour ces mêmes éléments) $\sigma = 2890$ heures.
- 3) Le MTBF d'un TC d'après l'usure des ailettes THP (loi exponentielle) est égale à 19530 heures
- 4) L'intervalle de confiance pour ces éléments est de : $17640 h < MTBF < 27910 h$

3.5.2 Etudes statistiques sur les turbocompresseurs de la station de compression de Ain Naga du gazoduc Enrico Mattei reliant Hassi R'mel à l'Italie

1) Tableau des heures de fonctionnement entre des pannes

N° de panne	TBF			
	TC1	TC2	TC3	TC4
1	47,2	62,4	283	104,47
2	67,2	406	552	152,89
3	114,5	92,5	117,7	86,14
4	36,1	1371,1	47,8	65,3
5	27	1101,5	182,5	1723,5
6	0,2	564,7	1583,7	1
7	803,1	6,4	3238,7	35,6
8	1300,5	2769	3400,9	2213,6
9	967,1	476,1		50,2
10	1474,3	0,3		

Tableau 3.11 Heures d'exploitation

A cause de l'insuffisance des données obtenue de chaque turbocompresseur on ne peut pas faire un traitement statistique classique, on procédera a un regroupement d'échantillons

Un test statistique peut être mis à profit pour traiter ce problème. On peut citer le test d'égalité de variance de Fisher, qui est le plus couramment utilisé.

3.5.2.1 Application du test de Fisher

. Application du test de Fisher-: TC1 et TC2.

$F < F_{0.05}$ l'hypothèse est valide on peut regrouper les deux échantillons.

. Application du test de Fisher TC1 TC2 et TC3.

$F > F_{0.05}$ l'hypothèse est n'est pas valide on ne peut pas regrouper les deux échantillons.

Si on élimine les deux valeurs extrêmes 3238,7 et 3400,9 de l'échantillon TC3 ;

On trouve les résultats suivants :

$F < F_{0.05}$ l'hypothèse est valide on peut regrouper les deux échantillons.

. Application du test de Fisher TC1 TC2 et TC3 avec TC4.

$F < F_{0.05}$ l'hypothèse est valide on peut regrouper les échantillons.

L'histogramme correspondant au tableau statistique ci-dessus est représenté sur la figure suivant :

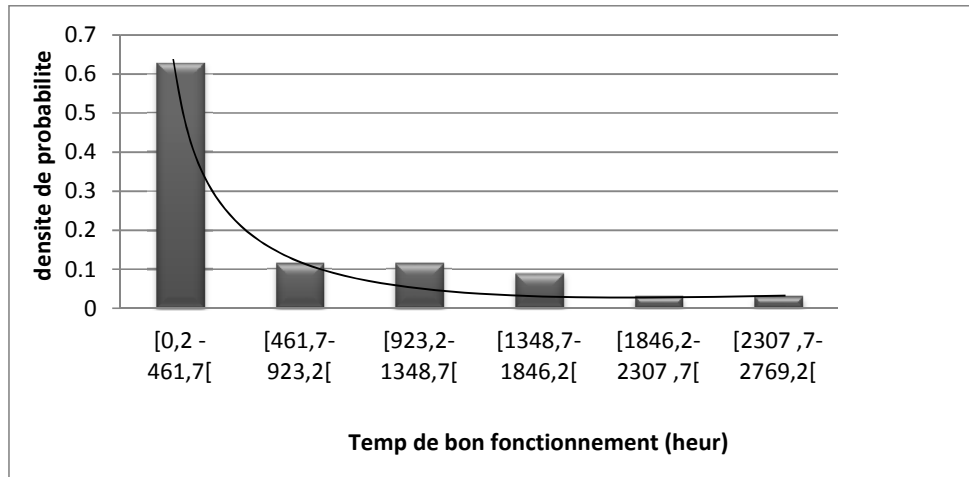


Figure 3.11 Histogramme de temps de bon fonctionnement

A la vue de l'histogramme on peut émettre l'hypothèse d'une distribution exponentielle de l'échantillon.

3.5.2.2 Le test de Kolmogorov pour le temps d'exploitation

Taux de défaillance λ

$$MTBF = \frac{\sum TBF}{N} = 539,87 \text{ h} \quad \lambda = \frac{1}{MTBF} = 0,0018 \text{ h}^{-1}$$

n°	intervalle	Ni	ni/n	F*(t)= $\sum ni/n$	F(t)= $1-e^{-\lambda t}$	D _i = F*(t)-F(t)	D _n =D _{max}
1	[0,2 - 461,7[	22	0,62857143	0,62857143	0,564	0,06457143	
2	[461,7- 923,2[	4	0,11428571	0,74285714	0,81	0,06714286	0,06714286
3	[923,2- 1348,7[	3	0,11428571	0,85714285	0,911	0,05385715	
4	[1348,7 1 846,2[	3	0,08571429	0,94285714	0,96	0,01714286	
5	[1846,2 2307,7[	1	0,02857143	0,97142857	0,984	0,01257143	
6	[2307,7 2769,2[	1	0,02857143	1	0,99	0,01	

Tableau 3.13 Test de Kolmogorov pour le temps d'exploitation

Nous avons : $D_n = 0,06714286$

D'après le tableau : $A(n : \varepsilon) = A(6 : 0.01) = 0.468$.

Alors : $d_n < 0.468$.

on conclue que l'hypothèse est vérifiée. Les données d'exploitation suivent une loi exponentielle

3.5.2.3 Estimation de λ

L'estimation par intervalle permettant d'apporter un jugement sur la qualité de l'estimation. Pour le cas d'une loi exponentielle on a les formules suivantes :

$$\lambda_{\inf} = \frac{\chi^2\left(\frac{\alpha}{2}, 2r\right)}{2 * T}$$

$$\lambda_{\sup} = \frac{\chi^2\left(1 - \frac{\alpha}{2}, 2r + 2\right)}{2 * T}$$

Pour le calcul des bornes de l'intervalle de confiance de taux de défaillances pour un niveau de confiance de (1-alpha)= 90%.

Avec : r : nombre de défaillance.

2x r : degré de liberté.

NOMBRE DE PANNES	T : DUREE CUM DE TBF	$\chi^2\left(\frac{\alpha}{2}, 2r\right)$	$\chi^2\left(1 - \frac{\alpha}{2}, 2r + 2\right)$	λ	$\lambda_{\inf}$	$\lambda_{\sup}$
r = 35	18886,6	51,739	92,808	0,00185317	0,00136	00024

Tableau 3.14 Estimation de défaillance λ

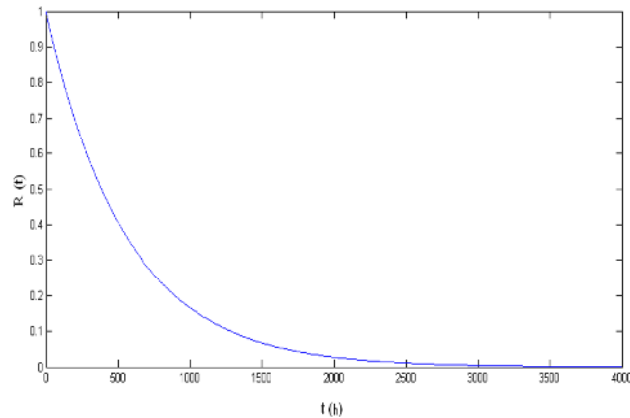


Figure 3.12 Courbe de la fiabilité R(t)

Données sur les heures de réparation : T(h)

N° de panne	T T R			
	TC1	TC2	TC3	TC4
1	3	0.5	23	4
2	28	12.2	48	8
3	36	0.5	11.6	72
4	4	11.5	72	36
5	23	6400	12	15
6	30	207.3	8	28.6
7	35.5	39	3	8
8	95	20	12.1	67
9	43	480		2098
10	48	3700		264

Tableau 3.15 Heures de réparation : T(h)

L'histogramme correspondant au tableau statistique ci-dessus est représenté sur la figure suivante :

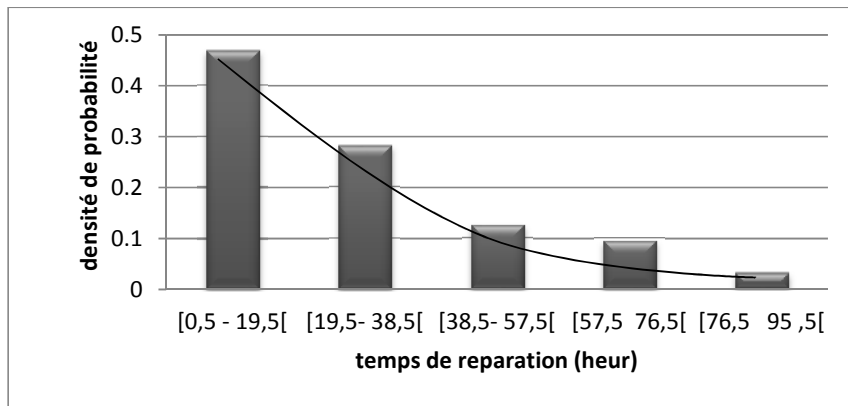


Figure 3.13 L'histogramme de temps de réparation

A la vue de l'histogramme on peut émettre l'hypothèse d'une distribution exponentielle de l'échantillon

Taux de réparation μ

$$MTTR = \frac{\sum TTR}{N} = 31,04 \text{ h}$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} = 0,0322 \text{ h}^{-1}$$

3.5.2.4 Test de Kolmogorov pour les temps de réparation

n°	intervalle	ni	ni/n	F*(t) =Σni / n	F(t) =1-e ^{-μt}	Di = F*(t)-F(t)	Dn =Dmax
1	[0,5 - 19,5[	15	0,46875	0,46875	0,466	0,00275	
2	[19,5- 38,5[	9	0,28125	0,75	0,71	0,04	
3	[38,5- 57,5[	4	0,125	0,875	0,843	0,032	
4	[57,5 76,5[	3	0,09375	0,96875	0,914	0,0547	0,0547
5	[76,5 95,5[	1	0,03125	1	0,953	0,047	

Tableau 3.16 Test de Kolmogorov pour les temps de réparation

Nous avons : $D_n = 0,0547$.

D'après le tableau : $A(n; \varepsilon) = A(5; 0.01) = 0.668$. Alors $d_n < 0.668$.

On conclue que l'hypothèse est vérifiée. Les données d'exploitation suivent une loi exponentielle

3.5.2.5 Estimation de taux de réparation μ

$$\mu_{\inf} = \frac{\chi^2\left(\frac{\alpha}{2}, 2r\right)}{2 * T} ; \quad \mu_{\sup} = \frac{\chi^2\left(1 - \frac{\alpha}{2}, 2r + 2\right)}{2 * T}$$

NOMBRE DE PANNE	T : DUREE CUM DE TTR	$\chi^2\left(\frac{\alpha}{2}, 2r\right)$	$\chi^2\left(1 - \frac{\alpha}{2}, 2r + 2\right)$	μ	$\mu_{\inf}$	$\mu_{\sup}$
r = 32	745	46.595	85.965	0,0322	0,03127181	0,05769463

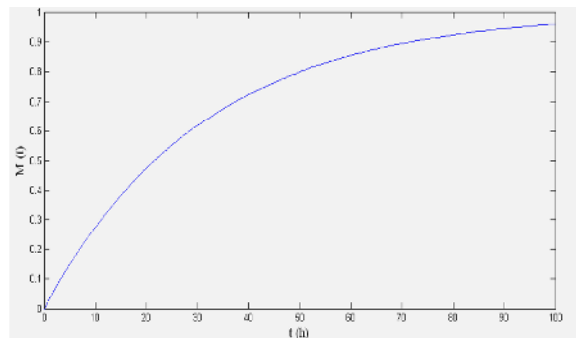
Tableau 3.17 Estimation de taux de réparation μ 

Figure 3.14 Courbe de la maintenabilité

3.6 APPLICATION DES CHAINES DE MARKOV POUR LA MODELISATION DE LA DISPONIBILITE ET LA FIABILITE

3.6.1 Théorie des chaines de Markov

Pour tenir compte des dépendances entre les différents éléments d'un système on construit un graphe décrivant son comportement dynamique, dont les sommets correspondront aux différents états du système et dont les arcs correspondront aux transitions entre les états.

Graphe des états

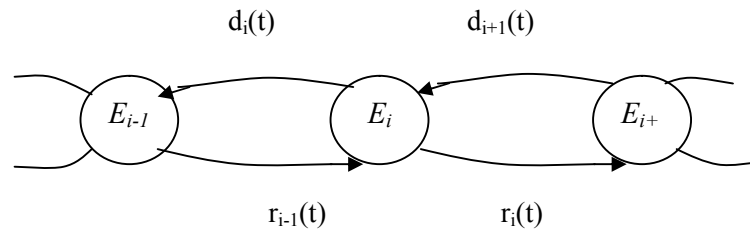


Figure 3.15 Graphe d'état

.Où dans le cas de taux de défaillance et de taux de réparation constants et valant λ et μ ,

$$d_i(t) = \lambda \times (\text{nombre de composants en fonctionnement})$$

$$r_i(t) = \mu \times \min(n - i, r).$$

Lorsque les $d_i(t)$ et $r_i(t)$ ne dépendent pas du temps, on peut calculer les probabilités stationnaires à l'aide de chaînes de Markov

Dans un système non réparable, l'état du système ne peut évoluer que dans le sens d'une décroissance d'indice, tandis que dans un système réparable l'indice de l'état décroît lors d'une défaillance, mais croît lors d'une réparation.

L'évolution des états d'un système peut être représentée par graphe orienté des états. Les nœuds constituent les états et les arcs représentent les transitions entre états (la figure.4.3)

$$P_i = \frac{\prod_{j=0}^{i-1} r_j}{\prod_{j=1}^i d_j} \cdot P_0 \quad (3.33)$$

P_i = probabilité d'avoir i composants en bon état de fonctionnement)

On a de plus la condition $\sum P_i = 1$, ce qui permet d'obtenir les P_i , ($i = 0, \dots, n$.)

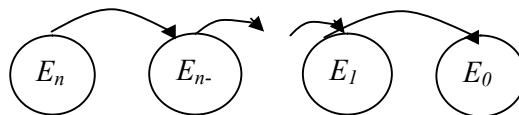


Figure 3.16 Graphe d'état pour système non réparable

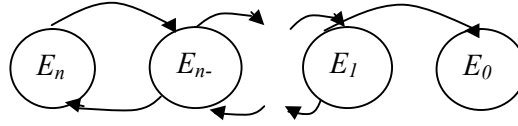


Figure 3.17 Graphe d'état pour système réparable

Les équations d'état du système

Dans le cas d'un processus homogène les termes $d_i(t)$ et $r_i(t)$ sont constants et $p_i(t)$ est différentiable. L'ensemble des équations différentielles constitue les équations d'états du système. Matriciellement [7-44], on obtient en supposant que $E=\{1,2, \dots, n\}$:

$$\left[\frac{dp_1}{dt}(t), \frac{dp_2}{dt}(t), \dots, \frac{dp_n}{dt}(t) \right] = [p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)] A \quad (3.34)$$

La matrice A est appelée matrice des taux de transition.. La fiabilité étant la probabilité pour que le système se trouve dans un état de marche sans jamais être passer par un état de panne, il suffira de supprimer les transitions des états de panne vers les états de marches dans la matrice A pour calculer la fiabilité

3.6.1.1 Application à la fiabilité

À l'origine des temps, on suppose généralement que tous les composants sont bons, d'où :

$$P_n(0) = 1 ; P_i(0) = 0, \forall i \neq n \quad (3.35)$$

Si par contre on démarre d'un état où seuls k composants sont bons, on devra avoir comme conditions initiales :

$$P_k(0) = 1 ; P_i(0) = 0 ; \forall i \neq k \quad (3.36)$$

Pour calculer la fiabilité d'un système, on recherche l'état E_d d'indice le plus élevé qui entraîne la défaillance du système (état absorbant) et l'on a :

$$R(t) = \sum_{i=d+1}^n P_i(t) = 1 - \sum_{i=0}^d P_i(t) \quad (3.37)$$

Associé à :

$$r_j(t) = 0, \forall j \leq k$$

3.6.1.2 Application à la disponibilité

On détermine, comme pour la fiabilité, l'état E_d d'indice le plus élevé entraînant la défaillance du système, mais on conserve dans le système d'équations tous les termes $r_i(t)$.

La disponibilité est alors :

$$A(t) = \sum_{i=d+1}^n P_i(t) = 1 - \sum_{i=0}^d P_i(t)$$

3.6.1.3 Fiabilité , disponibilité des systèmes mis en redondance

3.6.1.3.1 Redondance active totale

Dans l'état E_i , il y a i composants en fonctionnement, donc $d_i(t) = i\lambda$. Soit τ la moyenne des temps de réparation et $\mu = 1/MTTP$ le taux de réparation. Si un réparateur est toujours disponible, on aura : $r_i(t) = \mu$. [25]

Les équations d'état pour la redondance active totale sont alors:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} P_n(t) = -n\lambda P_n(t) + \mu P_{n-1}(t) \\ \dots\dots\dots \\ \frac{d}{dt} P_i(t) = P_{i+1}(t)(i+1)\lambda - (i\lambda + \mu)P_i(t) + \mu P_{i-1}(t) \\ \dots\dots\dots \\ \frac{d}{dt} P_0(t) = \lambda P_1(t) \end{array} \right. \quad (3.38)$$

Le système d'équation sous forme matricielle s'écrit :

$$\begin{bmatrix} 1-n\lambda\Delta t & \mu\Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ n\lambda\Delta t & 1-[\mu+(n-1)\lambda\Delta t] & \mu\Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots\dots\dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots\dots\dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (i+1)\lambda\Delta t & 1-[\mu+i\lambda\Delta t] & \mu\lambda\Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots\dots\dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots\dots\dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\lambda\Delta t & 1-(\lambda+\mu)\Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda\Delta t \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_n(t) \\ P_{n-1}(t) \\ \dots\dots\dots \\ P_i(t) \\ \dots\dots\dots \\ P_1(t) \\ P_0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_n(t+\Delta t) \\ P_{n-1}(t+\Delta t) \\ \dots\dots\dots \\ P_i(t+\Delta t) \\ \dots\dots\dots \\ P_1(t+\Delta t) \\ P_0(t+\Delta t) \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

3.6.1.3.2 Redondance active partielle

Le schéma sera semblable, mais l'état absorbant (défaillance du système) correspondra à l'état E_{k-1} et la fiabilité sera :

$$R_{k/n}(t) = \sum_{i=k}^n P_i(t) = 1 - \sum_{i=0}^{k-1} P_i(t) \quad (3.40)$$

3.6.1.3.3 Redondance séquentielle totale

Dans un état e_i , il n'y a qu'un seul composant en service, dont le taux de défaillance est λ_1 et $(i - 1)$ composants en réserve dont le taux de défaillance est λ_0 (λ_0 pouvant être nul). Le graphe des états autour de l'état E_i est représenté (figure 4.6), si μ est le taux de réparation des composants en réserve et qu'une seule réparation est faite à la fois. L'état absorbant du système est l'état E_0 .

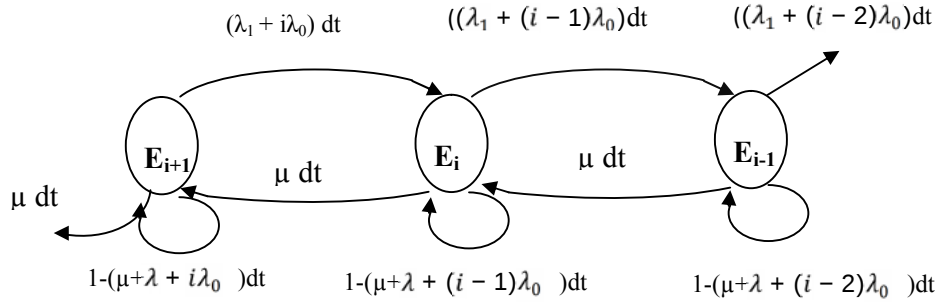


Figure 3.18 Graphe d'état de redondance séquentielle totale

3.6.1.3.4 Redondance séquentielle partielle

Le système nécessite k composants actifs et dans l'état initial E_n on dispose de $(n - k)$ composants de réserve. Dans l'état E_i , il y aura k composants actifs dont le taux de défaillance est λ_1 et $(i - k)$ composants en réserve, de taux de défaillance λ_0 . L'état absorbant du système est l'état $E_{(k-1)}$. Le graphe des états autour de l'état E_i est représenté

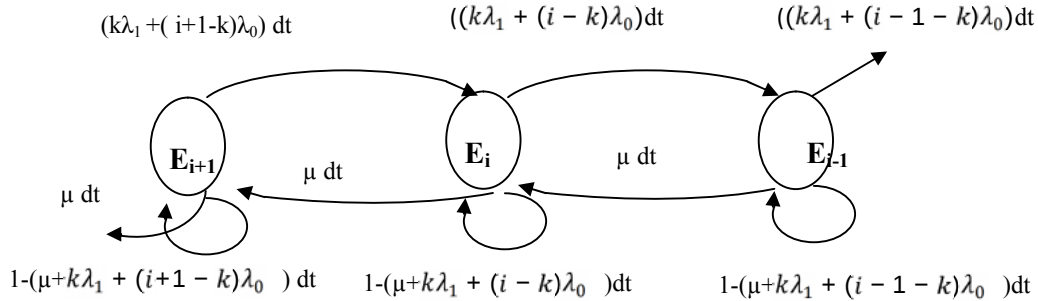


Figure 3.19 Graphe d'état de redondance séquentielle partielle

3.6.2 Calcule de la disponibilité et la fiabilité des TC des stations de compression

3.6.2.1 Calcul de la disponibilité et de la fiabilité d'un système TC de la configuration (1+1)

Nous considérons que nous avons un élément principal et un élément en réserve.

En utilisant le graphe des états de MARKOV

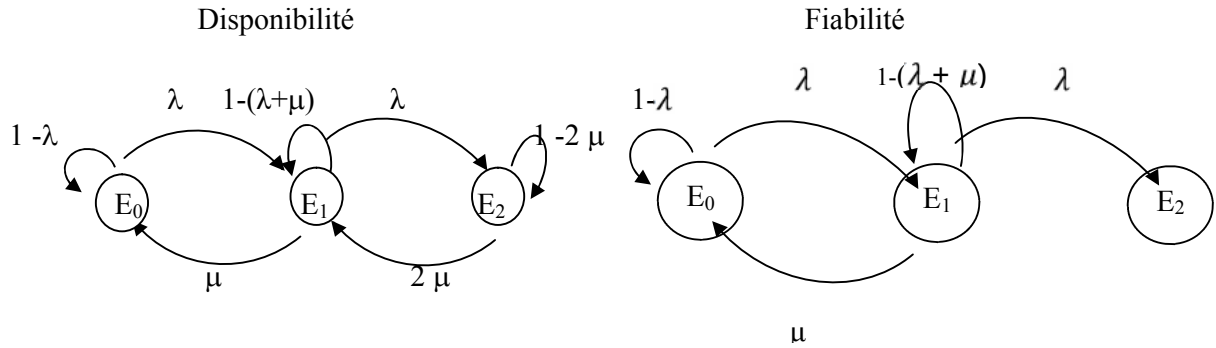


Figure 3.20 Graphe des états de la disponibilité et fiabilité

- Le premier état (**E₀**) représente une absence de panne.
- Le dernier état (**E₂**) représente une défaillance totale de système.

Entre ces deux états il y a un état intermédiaire qui représente une défaillance partielle du système.

Equation d'état du système

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda p_0(t) - (\lambda + \mu)p_1(t) + 2\mu p_2(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \lambda p_1(t) - 2\mu p_2(t) \end{cases}$$

Conditions initiales :

$$p_0(0) = 1, p_1(0) = p_2(0) = 0$$

Sous forme matricielle on aura on aura :

$$\begin{bmatrix} \frac{dp_0}{dt}(t) \\ \frac{dp_1}{dt}(t) \\ \frac{dp_2}{dt}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \\ p_2(t) \end{bmatrix} \cdot A$$

D'où la matrice de transition A :

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda & \mu & 0 \\ \lambda & -(\mu + \lambda) & 2\mu \\ 0 & \lambda & -2\mu \end{bmatrix}$$

Dans le cas de régime stationnaire :

$$\begin{bmatrix} \frac{dp_0}{dt}(t) \\ \frac{dp_1}{dt}(t) \\ \frac{dp_2}{dt}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ et } \sum_{i=0}^n P_i = 1$$

Les équations sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} -\lambda & \mu & 0 \\ \lambda & -(\mu + \lambda) & 2\mu \\ 0 & \lambda & -2\mu \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \\ p_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Calcul de la disponibilité (1+1)

Probabilité d'avoir n élément en panne			D _{TC} (disponibilité du système) D _{TC} = P ₀ + P ₁
P ₀	P ₁	P ₂	
0.9453	0.0534	0.0013	0,9987

Tableau 3.18 Résultat de la disponibilité configuration (1+1)

Calcul de la fiabilité

Le calcul de la fiabilité est déduit du calcul de la disponibilité

Probabilité d'avoir n élément en panne			R _{TC} (au moins un TC en bon R _{TC} = P ₀ + P ₁)	Fiabilité du système $R(t) = e^{-\lambda_s t}$
P ₀	P ₁	P ₂		
0.9553	0.043	0.0017	0.9983	

Tableau 3.19 Résultat de la fiabilité configuration (1+1).

Pour savoir l'influence de la disponibilité de la pièce de rechange ainsi le taux de non démarrage de l'élément en réserve sur la disponibilité et la fiabilité de système, une modélisation par le graphe de MARKOV va nous permettre d'introduire une hypothèse suivante :

- Une seule équipe de réparation.
- Le taux de non démarrage de l'élément en réserve $\gamma = 0,018523$.
- La probabilité de non disponibilité de la pièce $\beta = 0,13578947$.
- Le taux d'attente avant réparation est $\mu' = 0,00809$.

Calcul de la disponibilité

Soit le graphe des états :

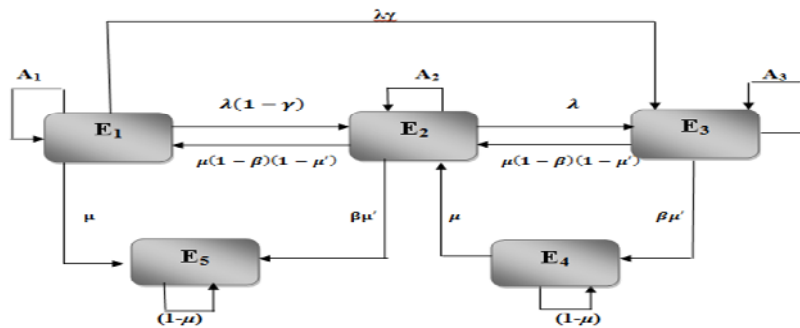


Figure 3.21 Graphe des états de la disponibilité.

Les états de système

E₁ : 0 TC en panne (TC en exploitation et le TC en réserve sont en bon état)

E₂ : 01 TC en panne (TC en exploitation en panne et le TC en réserve sont en bon état)

E₃ : 02 TC en panne (TC en exploitation et le TC en réserve sont en panne)

E₄ : 02 TC en panne (TC en exploitation et le TC en réserve sont en panne)

E₅ : 01 TC en panne (TC en exploitation en panne et le TC en réserve sont en bon état)

Equation d'état du système :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_1(t)}{dt} = -(\lambda\gamma + \lambda(1 - \gamma))p_1(t) + \mu(1 - \beta)(1 - \mu')p_2(t) + \mu p_5(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \lambda(1 - \gamma)p_1(t) - (\lambda + \mu(1 - \beta)(1 - \mu') + \beta\mu')p_2(t) + \mu(1 - \beta)(1 - \mu')p_3(t) + \mu p_4(t) \\ \frac{dp_3(t)}{dt} = \lambda\gamma p_1(t) + \lambda p_2(t) - (\mu(1 - \beta)(1 - \mu') + \beta\mu')p_3(t) \\ \frac{dp_4(t)}{dt} = \beta\mu'p_3(t) - \mu p_4(t) \\ \frac{dp_5(t)}{dt} = \beta\mu'p_2(t) - \mu p_5(t) \end{array} \right.$$

Les conditions initiales :

$$p_1(0) = 1, p_2(0) = p_3(0) = p_4(0) = p_5(0) = 0$$

Sous forme matricielle on aura : avec

$$A_1 = -(\lambda\gamma + \lambda(1 - \gamma))$$

$$A_2 = -(\lambda + \mu(1 - \beta)(1 - \mu') + \beta\mu')$$

$$A_3 = -(\mu(1 - \beta)(1 - \mu') + \beta\mu')$$

$$\begin{bmatrix} A_1 & \mu(1-\beta)(1-\mu') & 0 & 0 & \mu \\ \lambda(1-\gamma) & A_2 & \mu(1-\beta)(1-\mu') & \mu & 0 \\ \lambda\gamma & \lambda & A_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta\mu' & -\mu & 0 \\ 0 & \beta\mu' & 0 & 0 & -\mu \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \\ p_3(t) \\ p_4(t) \\ p_5(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dp_1}{dt}(t) \\ \frac{dp_2}{dt}(t) \\ \frac{dp_3}{dt}(t) \\ \frac{dp_4}{dt}(t) \\ \frac{dp_5}{dt}(t) \end{bmatrix}$$

Dans le cas de régime stationnaire la représentation matricielle du système s'écrit :

$$\begin{bmatrix} A_1 & \mu(1-\beta)(1-\mu') & 0 & 0 & \mu \\ \lambda(1-\gamma) & A_2 & \mu(1-\beta)(1-\mu') & \mu & 0 \\ \lambda\gamma & \lambda & A_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta\mu' & -\mu & 0 \\ 0 & \beta\mu' & 0 & 0 & -\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \\ p_3(t) \\ p_4(t) \\ p_5(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Cas Probabilité des états E _n	1 ^{er} cas : $\gamma = 0,018523$ $\mu' = 0,00809$ $\beta = 0,13578947$	2 ^{ème} cas : $\beta = 0$	3 ^{ème} cas : $\gamma = 0$	4 ^{ème} cas : $\beta = 0$ $\gamma = 0$
P ₁	0.9335	0.9454	0.9364	0.4860
P ₂	0.0366	0.0443	0.0412	0.0281
P ₃	0.0155	0.006	0.015	0.0015
P ₄	0.0131	0.004	0.005	0.0045
P ₅	0.0023	0.0002	0.0024	0.48
Disponibilité du système D _{TC} =P ₁ +P ₂ +P ₅	0.9724	0.9899	0.98	0.994

Tableau 3.20 Résultat de la disponibilité configuration (1+1)

Calcul de la fiabilité

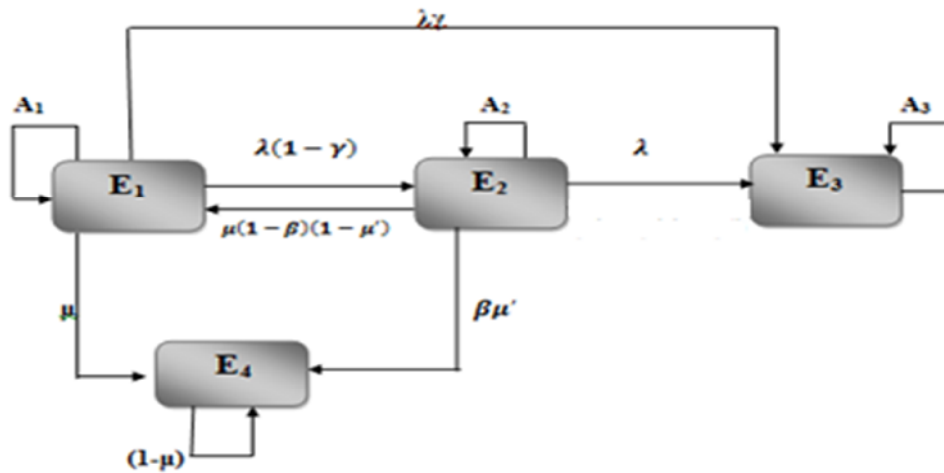


Figure 3.22 Graphe de l'état de fiabilité

Dans le cas de régime stationnaire les équations de système l'équation sous forme matricielle de systèmes s'écrit:

$$\begin{bmatrix} A_1 & \mu(1-\beta)(1-\mu') & 1 & \mu \\ \lambda(1-\gamma) & A_2 & 0 & 0 \\ \lambda\gamma & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \beta\mu' & 0 & -\mu \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \\ p_3(t) \\ p_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Cas Probabilité des Etats E_n	1 ^{er} cas : $\gamma = 0,018523$ $\beta = 0,13578947$ $\mu' = 0,00809$	2 ^{ème} cas : $\beta = 0$	3 ^{ème} cas $\gamma = 0$	4 ^{ème} cas $\beta = 0$ $\gamma = 0$
P ₁	0.9922	0.9490	0.9921	0.9481
P ₂	0.0059	0.0509	0.0060	0.0518
P ₃	0.0017	0.0001	0.0017	0.0001
P ₄	0.0002	0.0000	0.0002	0.0000
$R_{TC} = P_1 + P_2 + P_4$	0.9983	0.999	0.9983	0.999

Tableau 3.21 Résultat de la fiabilité pour la configuration (1+1).

3.6.2.2 Calcul de la disponibilité et de la fiabilité d'un système TC de la configuration (3+1) et (3+0):

On prend une station de compression avec : 03 turbocompresseurs principaux et un turbocompresseur en stand-by .

Calcul de la disponibilité configuration (3+1)

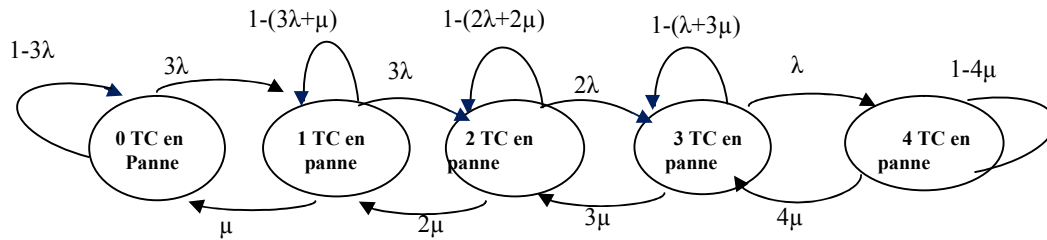


Figure 3.23 Graphe de l'état de disponibilité

Probabilité d'avoir n élément en panne					Disponibilité de système $D_{TC} = P_0 + P_1$
P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	
0.8417	0.1453	0.0125	0.0005	0.0000	0.987

Tableau 3.22 Résultat de la disponibilité pour la configuration (3+1)

Calcul de La fiabilité configuration (3+1)

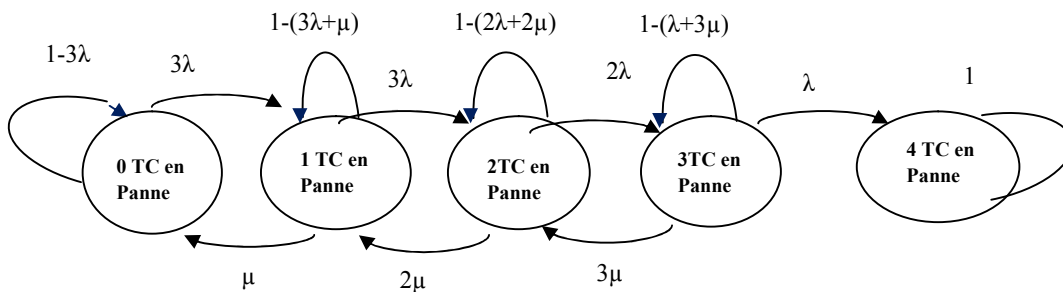
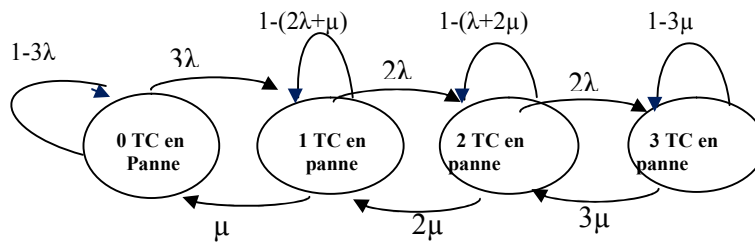


Figure 3.24. Graphe de l'état de la fiabilité

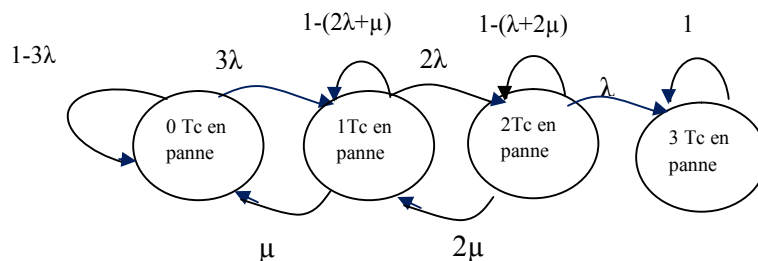
Probabilité d'avoir n élément en panne					Fiabilité du système $A_{TC} = P_0 + P_1$
P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	
0.8417	0.1453	0.0125	0.0005	0.0000	0.987

Tableau 3.23 Résultat de fiabilité pour la configuration (3+1)

On prend une station de compression avec : 03 turbocompresseurs principaux et 0 turbocompresseur en stand-by :

Calcul de la disponibilité du système (3+0)**Figure 3.25** Graphe de l'état de disponibilité

Probabilité d'avoir n élément en panne				Disponibilité de système $D_{TC} = P_0$
P_0	P_1	P_2	P_3	
0.83725	0.12955	0.0125	0.0005	0.83725

Tableau 3.24 Résultat de disponibilité pour la configuration (3+0)**Calcul de La fiabilité du système (3+0)****Figure 3.26** Graphe de l'état de la fiabilité

Probabilité d'avoir n élément en panne				Fiabilité du système $R_{TC} = P_0$
P_0	P_1	P_2	P_3	0.8417
0.8417	0.1453	0.0125	0.0005	

Tableau 3.25 Résultat de fiabilité pour la configuration (3+0)

3.6.2.3 Interprétation des résultats :

Nous remarquons que la disponibilité de la pièce de rechange ainsi que le taux de non démarrage de l'élément en réserve influence sur la disponibilité et la fiabilité de système des turbocompresseurs.

En analysant les résultats, on constate :

- La disponibilité et la fiabilité de système des turbocompresseurs augmentent lorsque on élimine Le taux de non démarrage de l'élément en réserve ($\gamma = 0$) et la probabilité de non disponibilité de la pièce ($\beta = 0$)
- L'influence de la disponibilité de la pièce de rechange sur la disponibilité et la fiabilité de système est plus grande que celle de non démarrage de l'élément en réserve.
- la configuration (3+1) avec un TC de réserve reste la meilleure configuration permettant de maximiser la disponibilité.

3.7 CONCLUSION :

Ce chapitre a été consacré aux principales caractéristiques pour évaluer la FMD (Fiabilité Maintenabilité Disponibilité). Nous avons présenté les principales lois mathématiques nécessaires pour les mesures de la F.M.D des installations mécaniques

Par ailleurs nous avons présenté les principales caractéristiques des systèmes mécaniques qui peuvent influencer le calcul de la fiabilité. Ces caractéristiques peuvent être résumées en quelques points:

- La notion du taux de défaillance constant n'existe pas,
- Le recueil de l'information sur la fiabilité est plus difficile,
- Les défaillances ont des origines très variées (la durée de vie des composants est principalement conditionnée par les problèmes de fatigue avec une forte influence des différentes contraintes),
- Le système mécanique est de plus en plus complexe et performant.
- Un endommagement ou une rupture d'un composant peut entraîner l'arrêt global du système avec des détériorations irréversibles.

Ceci nous a conduit à la présentation graphique des différentes caractéristiques de la fiabilité et de maintenabilité des turbocompresseurs de la ligne Hassi Rmel –Skikda utilisant une étude statistique où les données sont issues du retour d'expérience, de jugements d'experts et de bases de données en vue de tirer la meilleure qualité d'estimation, mais nous avons rencontré beaucoup de problèmes pour l'acquisition de ces données à cause du manque de l'historique des pannes dans les stations de compressions ;

Ensuite et après la représentation graphique de la densité de défaillance nous constatons que ;

- Les systèmes d'étanchéité des turbocompresseurs suivent une loi de distribution normale c'est à dire qu'ils sont en période de vieillissement.
- La densité de probabilité des turbocompresseurs de la station de Ain Naga suivent une loi de distribution exponentielle c'est à dire qu'ils sont en période de vie utile

Enfin on nous a montré comment on peut évaluer la disponibilité et la fiabilité des turbocompresseurs d'une station de compression à l'aide de la théorie des chaînes de Markov ainsi qu'on a prouvé que la configuration (3+1) est la meilleure permettant de maximiser la disponibilité

4.1 INTRODUCTION

A cause de la grande influence du temps de réparation sur la disponibilité des turbocompresseurs, dans ce chapitre, on mettra l'accent sur la fiabilité des ateliers de réparation en utilisant la théorie des files d'attente, et nous montrerons comment tirer profit de nos connaissances sur la théorie des chaînes de Markov pour nous aider dans l'analyse des phénomènes d'attente

Ensuite nous ferons une application sur la base de maintenance de Biskra où le processus d'arrivée est poissonnien (la durée d'attente entre deux réparations consécutives est exponentielle).

Enfin nous présentons des propositions afin d'améliorer la disponibilité des installations du transport de gaz.

4.2 THEORIE DES FILES D'ATTENTE

Pour décrire un système de réparation, il faut pouvoir spécifier:

- Le mécanisme d'arrivée des éléments à réparer dans l'atelier (c'est à dire, en pratique, à quelle loi le processus d'arrivée va obéir).
- Le temps de réparation (sa durée et sa distribution de probabilité).
- La discipline de service (quand un stand se libère, quel élément choisit-on ?)

Le schéma d'un atelier de réparation peut être représenté comme suit :

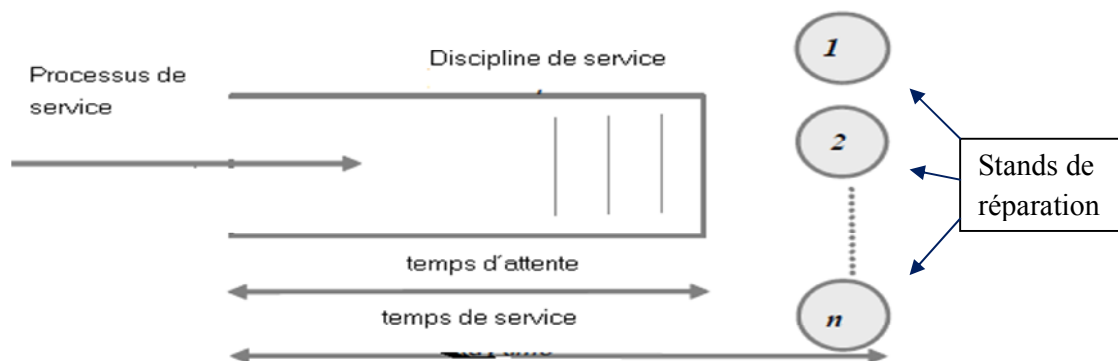


Figure 4.1 Le schéma d'un atelier de réparation

4.2.1 Processus de Poisson

Supposons que le processus des arrivées obéisse aux règles suivantes: La probabilité d'une arrivée dans un intervalle $[t, t + \Delta t]$ ne dépend pas de ce qui s'est passé avant l'instant t . C'est la propriété dite "sans mémoire"[53].

La probabilité d'apparition d'une demande est proportionnelle à Δt , la probabilité de plus d'un événement étant "négligeable" (infinitement petit d'ordre supérieur). Le coefficient de proportionnalité est noté λ (intensité du processus).

La probabilité d'observer « k » arrivées dans un intervalle de longueur « t » vaut [54]:

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda t} \quad (4.1)$$

4.2.2 Processus des Services

Le processus de service pourra être d'une complexité extrême, mais on se borne le plus souvent à supposer que chaque durée de service est indépendante des autres, et qu'elles obéissent toutes à une même loi de distribution: on parle de variables indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d.). On décrira cette loi par sa distribution de probabilité[55] :

$$F(t) = P(\text{temps de réparation} \leq t)$$

4.2.2.1 La loi exponentielle

La loi de service la plus populaire est la loi exponentielle, qu'il est traditionnel d'écrire en utilisant comme "taux de service" la lettre μ :

$$F(t) = P(\text{temps de réparation} \leq t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (4.2)$$

La densité correspondante est

$$f(t) = \mu e^{-\mu t} \quad (4.3)$$

4.2.2.2 Lois d'Erlang

Supposons que le système de réparation soit composé d'un ensemble de k stands élémentaires exponentiels, identiques (c'est à dire, de même paramètre μ), et indépendants les uns des autres. Le temps du service est la somme des temps passés dans chaque stand [56].

Supposons $k = 2$. Notons T le temps total, t_1 et t_2 les durées des deux temps services; la distribution $F(t)$ est donnée par la *convolution* de F_1 et F_2 :

Chapitre 04 : Utilisation de la théorie des files d'attente et la théorie de Markov pour la résolution des problèmes de disponibilité des installations

$$P\{T \leq t\} = P\{t_1 + t_2 \leq t\} = \int_{u=0}^t F_1(t-u) dF_2(u) \quad (4.4)$$

Evidemment, F_1 et F_2 sont identiques, et correspondent à l'exponentielle.

$$P\{T \leq t\} = \int_{u=0}^t \left[1 - e^{-\mu(t-u)} \right] \mu e^{-\mu t} du = 1 - e^{-\mu t} - \mu t e^{-\mu t} \quad (4.5)$$

On peut montrer que la mise en service de k stands de réparation exponentiels de même paramètre μ conduit à une distribution

$$F(t) = P(t_1 + t_2 + \dots + t_k \leq t) = 1 - \sum_{j=0}^k \frac{(\mu t)^j}{j!} \cdot e^{-\mu t} \quad (4.6)$$

On appelle cette distribution la *distribution d'Erlang-k*, et la loi de probabilité [6] est la "loi d'Erlang-k". Puisqu'il s'agit d'une somme de variables aléatoires indépendantes, Moyenne et Variance s'obtiennent facilement, comme la somme de la moyenne et de la variance de chaque variable exponentielle:

- Moyenne de la variable : k/μ .
- Variance de la variable : $k/(\mu^2)$
- Le coefficient de variation est $1/\sqrt{k}$.

4.2.3 Le système sans file d'attente :

Considérons le système avec défaillance (sans file d'attente) comme étant le plus simple.

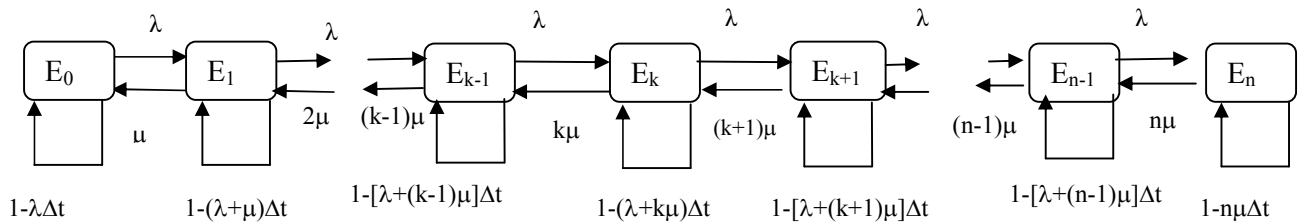


Figure 4.2. Système sans files d'attente

Les états de Système [24] :

- E_0 – tous les stands de réparation sont libres (aucune demande de réparation)
- E_1 – un stand occupé (une demande de réparation) ;
-
- E_k – k stands occupés (k demandes de réparation);
-
- E_n – n stands occupés (tous). (n demandes de réparation)

Chapitre 04 : Utilisation de la théorie des files d'attente et la théorie de Markov pour la résolution des problèmes de disponibilité des installations

Déterminons la probabilité du système de se trouver dans un état $p_k(t)$. $k= 0,1,2,...,n$) pour n'importe quel moment t en admettant les hypothèses suivantes : le flux de la demande est exponentiel de paramètre λ [24].

$\mu = 1/MTTR$, où MTTR – espérance mathématique du temps de réparation TTR (time to repair)

$$g(t) = \mu e^{-\mu t} \quad (t > 0) \quad (4.7)$$

Le paramètre μ dans la formule (4.1.7) est analogue au paramètre λ dont la durée entre 2 événements successifs de flux élémentaire suit une loi exponentielle.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (t > 0) \quad (4.8)$$

Le paramètre λ peut être considéré comme la densité du flux de la demande. Analogiquement la grandeur μ peut être interprétée comme la densité du flux de libération du stand de réparation occupé (flux de réparation).

Imaginons un stand de réparation continuellement occupé (demandes de réparation continues). Alors il est évident que dans ce stand il y aura un flux de réparation élémentaire de densité μ .

Les flux de demande et de réparation étant élémentaires, le processus du système sera markovien.

Examinons les états possibles du système et leur probabilité :

$$P_0(t), P_1(t), \dots, P_n(t)$$

Pour n'importe quel moment on a :

$$\sum_{k=0}^n P_k(t) = 1 \quad (4.9)$$

Etablissons les équations différentielles pour toutes les probabilités à commencer par $P_0(t)$. Fixons le moment t et cherchons la probabilité ($P_0(t+\Delta t)$) qu'au moment $t + \Delta t$ le système se trouvera à l'état E_0 (tous les stands sont libres). Ce cas peut se réaliser en 2 variantes :

- A- au moment t le système se trouve à l'état E_0 , et durant Δt il reste dans l'état E_0 ;
- B- Au moment t le système se trouve à l'état E_1 et durant Δt un stand s'est libéré et le système passe à l'état E_0 .

Chapitre 04 : Utilisation de la théorie des files d'attente et la théorie de Markov pour la résolution des problèmes de disponibilité des installations

La probabilité de passer directement de l'état E_2 à l'état E_0 durant un temps infiniment petit Δt est négligeable par rapport à $P(A)$ et $P(B)$.

A partir du théorème des additions des probabilités nous aurons [60-61]:

$$P_0(t + \Delta t) \approx P(A) + P(B) \quad (4.10)$$

1) Trouvons la probabilité A d'après le théorème de multiplication. La probabilité que le système se trouve à l'état E_0 à l'instant t est égale à $P_0(t)$. La probabilité que durant Δt il n'y aura aucune demande de réparation (le système restera dans l'état) est égale à $e^{-\lambda \cdot \Delta t}$. La probabilité étant faible nous pouvons écrire :

$$e^{-\lambda \cdot \Delta t} \approx 1 - \lambda \cdot \Delta t \quad (4.11)$$

$$\text{Ce qui donne : } P(A) \approx P_0(t) \cdot (1 - \lambda \cdot \Delta t) \quad (4.12)$$

2) Pour $P(B)$, la probabilité qu'au moment t le système se trouve à l'état E_1 , est égale $P_1(t)$. La probabilité qu'au moment Δt un stand de réparation sera libre est égale à : $1 - e^{-\mu \cdot \Delta t}$. De même on peut écrire :

$$1 - e^{-\mu \cdot \Delta t} \approx \mu \cdot \Delta t \quad \text{Ce qui donne : } P(B) \approx P_1(t) \cdot \mu \cdot \Delta t \quad \text{De là on peut écrire :}$$

$$P_0(t + \Delta t) \approx P_0(t)(1 - \lambda \cdot \Delta t) + P_1(t) \cdot \mu \cdot \Delta t \quad (4.13)$$

Nous pouvons facilement déduire :

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \quad (4.14)$$

On peut obtenir de la même façon les autres équations différentielles pour les autres états $P_k(t + \Delta t)$. Exemple pour la probabilité $P_k(t + \Delta t)$. Pour $0 < k < n$. La probabilité que le système soit dans l'état E_k est la somme de 3 probabilités :

$$P_k(t + \Delta t) = P(A) + P(B) + P(C) \quad (4.15)$$

P(A) – Probabilité qu'au moment t le système se trouve dans l'état E_k (il y a k stands occupés) et durant Δt il reste dans cette état c'est-à-dire pas de déplacement de l'état vers E_{k+1} ni vers l'état E_{k-1} (pas de demande de réparation et pas de stand libéré) ;

Chapitre 04 : Utilisation de la théorie des files d'attente et la théorie de Markov pour la résolution des problèmes de disponibilité des installations

P(B) - Probabilité qu'au moment t le système se trouve dans l'état E_{k-1} (k-1 stands occupés) et durant Δt il s'est déplacé vers l'état E_k (il y a une nouvelle demande) ;

P(C) - Probabilité qu'au moment t le système se trouve dans l'état E_{k+1} (k+1 stands occupés) et durant Δt il s'est déplacé vers l'état E_k (un stand s'est libéré). Pour trouver P(A) on écrit pour le cas de ni nouvelle demande ni libération de stand:

$$e^{-\lambda \Delta t} \left(e^{-\mu \Delta t} \right)^k = e^{-(\lambda + k\mu) \Delta t}. \text{ On peut écrire :}$$

$$e^{-(\lambda + k\mu) \Delta t} \approx 1 - (\lambda + k\mu) \Delta t, \text{ ce qui donne : } P(A) \approx P_k(t) [1 - (\lambda + k\mu) \Delta t]$$

$$\text{De même on obtient : } P(B) \approx P_{k-1}(t) \lambda \Delta t$$

$$\text{Et } P(C) \approx P_{k+1}(t) (k+1) \mu \Delta t$$

Alors :

$$P_k(t + \Delta t) \approx P_k(t) [1 - (\lambda + k\mu) \Delta t] + P_{k-1}(t) \lambda \Delta t + P_{k+1}(t) (k+1) \mu \Delta t.$$

L'équation différentielle pour $P_k(t)$ ($0 < k < n$) s'écrit donc :

$$\frac{dP_k(t)}{dt} = \lambda P_{k-1}(t) - (\lambda + k\mu) P_k(t) + \mu (k+1) P_{k+1}(t). \quad (4.16)$$

Etablissons l'équation pour la dernière probabilité :

$$P_n(t + \Delta t) \approx P_n(t) (1 - n\mu \Delta t) + P_{n-1}(t) \lambda \Delta t \quad (4.17)$$

Où :

$1 - n\mu \Delta t$ - probabilité que durant Δt aucun stand ne sera libéré ;

$\lambda \Delta t$ - probabilité que durant Δt il y aura une demande de réparation.

L'équation différentielle s'écrit :

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = \lambda P_{n-1}(t) - n\mu P_n(t) \quad (4.18)$$

Les équations différentielles du système s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} 1 - \lambda \Delta t & \mu \Delta t & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \lambda \Delta t & 1 - (\lambda + \mu) \Delta t & 2\mu \Delta t & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \lambda \Delta t & 1 - (\lambda + k\mu) \Delta t & (k+1)\mu \Delta t & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & \lambda \Delta t & 1 - n\mu \Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \\ \vdots \\ p_k(t) \\ \vdots \\ p_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_0(t + \Delta t) \\ p_1(t + \Delta t) \\ \vdots \\ p_k(t + \Delta t) \\ \vdots \\ p_n(t + \Delta t) \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

82

Chapitre 04 : Utilisation de la théorie des files d'attente et la théorie de Markov pour la résolution des problèmes de disponibilité des installations

Il est évident qu'au début de fonctionnement du système le processus d'écoulement ne sera pas encore stationnaire. Dans le système apparaîtra d'abord la phase transitoire d'un processus non stationnaire [59-60]. Cependant avec le temps la phase transitoire s'estampera et le système deviendra un système à régime stationnaire qui ne dépendra plus du temps

On peut démontrer que lorsque $t \rightarrow \infty$ alors toutes les probabilités $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_n(t) \rightarrow P_0$; P_1 ; P_2 ; P_n et leurs dérivés sont nulles. Alors on peut écrire les équations algébriques suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda P_0 + \mu P_1 = 0 \\ \lambda P_0 - (\lambda + \mu) P_1 + 2\mu P_2 = 0 \\ \dots\dots\dots \\ \lambda P_{k-1} - (\lambda + k\mu) P_k + (k+1)\mu P_{k+1} = 0 \quad 0 < k < n; \\ \dots\dots\dots \\ \lambda P_{n-2} - [\lambda + (n-1)\mu] P_{n-1} + n\mu P_n = 0; \\ \dots\dots\dots \\ \lambda P_{n-1} - n\mu P_n = 0; \end{array} \right. \quad (4.21)$$

En ajoutant la condition : $\sum_{k=0}^n P_k = 1$ on obtient :

$$P_1 = \frac{\lambda}{\mu} P_0; P_2 = \frac{\lambda^2}{2\mu^2} P_0; \dots\dots\dots; P_k = \frac{\lambda^k}{k!\mu^k} P_0; \quad (4.22)$$

4.2.4. Cas de système avec files d'attente :

On appelle système d'entretien avec file d'attente le cas où les pièces entrant dans le système, trouvant tous les stands occupés restent dans la file d'attente en attendant qu'un stand au moins soit libre [25].

1). Système avec files d'attente avec découragement (ou système combiné):

Dans ce cas les pièces défectueuses, trouvant les n stands occupés restent dans la file un certain temps bien déterminé ensuite elles quittent la chaîne sans être réparées.

2). Système avec files d'attente sans découragement (illimitées):

Si le temps d'attente dans la file n'est pas limité, le système s'appelle système sans découragement.

4.2.4.1. Système avec files d'attente avec découragement (ou système combiné):

Dans les systèmes avec file d'attente la discipline de service joue un rôle important. Les machines peuvent être servies soit dans un ordre déterminé (FIFO ou PAPS) soit dans un ordre préférentiel (certaines machines peuvent être servies en premier en fonction de l'importance du rôle qu'elle joue dans leur fonction) [56].

Examinons un système d'entretien combiné E avec n stands de réparation pour les conditions suivantes : A l'entrée du système il y a un flux de demandes élémentaires d'intensité λ . Le temps de service (de réparation) d'une demande TTR- exponentielle de paramètre $\mu = 1/\text{MTTR}$. La demande de réparation, en trouvant tous les stands occupés, reste dans la file dans l'attente d'une réparation. Le temps de séjour dans la file est limité par la durée T_{att} . Si durant cette période d'attente la pièce n'est pas servie elle quitte la file et ne sera pas servie.

La durée d'attente est aléatoire et est distribué par la loi exponentielle avec une densité :

$$h(t) = \nu \cdot e^{-\nu \cdot t} \quad (t > 0) \quad (4.23)$$

Désignons par $\nu = 1/E(T_{\text{att}})$ l'intensité d'attente dans la chaîne et $E(T_{\text{att}})$ – espérance mathématique de T_{att} (durée moyenne d'attente dans la file lorsque tous les stands sont occupés). T_{att} – durée d'attente.

Avec :

$$E\{T_{\text{att}}\} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{\text{att}i} \text{ - durée moyenne d'attente dans la file. } (T_{\text{attmoy}}) \quad (4.24)$$

Le paramètre ν est analogue aux paramètres λ - flux des demandes et μ - flux de service (réparation). Il peut être interprété comme la densité de liquidation de la file d'attente (combien de pièces ont quitté la file par unité de temps).

Imaginons une demande qui reste dans la file d'attente jusqu'à l'expiration de la durée T_{att} , ensuite elle quitte cette file d'attente pour la reprendre aussitôt. Dans ce cas le flux de libération de la file par une pièce en attente de réparation aura une densité ν .

Pour $\nu \rightarrow \infty$ ($T_{\text{attmoy}} \rightarrow 0$) le système deviendra un système sans file d'attente,

Pour $\nu \rightarrow 0$ ($T_{\text{attmoy}} \rightarrow \infty$) le système deviendra un système sans découragement

Pour une distribution exponentielle du temps d'attente T_{att} la capacité du service d'entretien ne dépend pas de l'ordre de service (FIFO ou autre aléatoire). Pour chaque demande de service la loi

Chapitre 04 : Utilisation de la théorie des files d'attente et la théorie de Markov pour la résolution des problèmes de disponibilité des installations

d'attente l'état E_n peut être obtenu non seulement à partir de E_{n-1} mais aussi à partir de E_{n+1} (tous les stands occupés, une demande en attente) [6-7-58].

Ecrivons l'équation différentielle pour la probabilité $P_n(t)$. L'équation d'état pour $P_n(t+\Delta t)$ s'écrit :

$$P_n(t + \Delta t) \approx P_n(t) (1 - \lambda \Delta t - n\mu \Delta t) + P_{n-1}(t) \lambda \Delta t + P_{n+1}(t) (n\mu + v) \Delta t \quad (4.26)$$

d'où :

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = -(\lambda + n\mu)P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t) + (n\mu + v)P_{n+1}(t) \quad (4.27)$$

Avec :

- 1) $P_n(t) (1 - \lambda \Delta t - n\mu \Delta t)$ – au temps t le système était dans l'état E_n et durant Δt il est resté dans cet état (il n'y a eu aucune demande de travaux $1 - \lambda \Delta t$ et aucun stand ne s'est libéré $1 - n\mu \Delta t$) ;
- 2) $P_{n-1}(t) \lambda \Delta t$ – au temps t le système était dans l'état E_{n-1} et durant Δt il est passé à l'état E_n (il y a une demande avec une probabilité de $\lambda \Delta t$) ;
- 3) $P_{n+1}(t) (n\mu + v) \Delta t$ – au temps t le système était dans l'état E_{n+1} (tous les stands occupés avec une demande en attente) et durant Δt il est passé à l'état E_n (il y a un stand qui s'est libéré et la demande en attente a occupé la place : probabilité $n\mu \Delta t$; ou bien a quitté la file d'attente sans être servi pour cause de fin de la durée d'attente : probabilité $v \Delta t$) ;

Les équations d'état pour les états probables du système sous forme matricielle s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} 1 - \lambda \Delta t & \mu & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \lambda & 1 - (\lambda + \mu) \Delta t & 2\mu \Delta t & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda & 1 - (\lambda + k\mu) \Delta t & (k+1)\mu \Delta t & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \lambda \Delta t & 1 - (\lambda + n\mu) \Delta t & (n\mu + v) \Delta t & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & \lambda \Delta t & 1 - (\lambda + n\mu + sv) \Delta t & n\mu + (s+1)v \Delta t & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \\ \vdots \\ p_k(t) \\ \vdots \\ p_n(t) \\ \vdots \\ p_{n+s}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_0(t + \Delta t) \\ p_1(t + \Delta t) \\ \vdots \\ p_k(t + \Delta t) \\ \vdots \\ p_n(t + \Delta t) \\ \vdots \\ p_{n+s}(t + \Delta t) \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Dans le cas de régime stationnaire les équations algébriques de système s'écrit :

Chapitre 04 : Utilisation de la théorie des files d'attente et la théorie de Markov pour la résolution des problèmes de disponibilité des installations

$$\left\{ \begin{array}{l} -\lambda P_0 + \mu P_1 = 0; \\ \lambda P_0 - (\lambda + \mu) P_1 + 2\mu P_2 = 0; \\ \dots \dots \dots \\ \lambda P_{k-1} - (\lambda + k\mu) P_k + (k+1)\mu P_{k+1} = 0; \quad 1 \leq k \leq n-1; \\ \dots \dots \dots \\ \lambda P_{n-1} - (\lambda + n\mu) P_n + (n\mu + \nu) P_{n+1} = 0; \\ \dots \dots \dots \\ \lambda P_{n+s-1} - (\lambda + n\mu + s\nu) P_{n+s} + [n\mu + (s+1)\nu] P_{n+s+1} = 0; \\ \dots \dots \dots \end{array} \right. \quad (4.29)$$

En ajoutant la condition : $\sum_{k=0}^n P_k = 1$ (4.30)

La solution du système peut s'écrire :

Posons: $\frac{\lambda}{\mu} = \lambda.MTTR = \rho$ et $\frac{\nu}{\mu} = \nu.MTTR = \beta$

ρ et β désignent respectivement le nombre moyen de demandes de travaux de réparation et le nombre moyen de libération de la file d'attente durant le temps de réparation d'une demande (d'une machine) [6-56]

a) La probabilité d'avoir k stands occupés s'écrit: ($0 \leq k \leq n$)

$$P_k = \frac{\frac{\rho^k}{k!}}{\sum_{k=0}^n \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^n}{n!} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\rho^s}{\prod_{m=1}^s (n+m\beta)}} \quad (4.31)$$

b) La probabilité d'avoir n stands occupés et s nombre de pièces en attente de réparation (parmi lesquelles une certaine quantité moyenne égale à β , quitte la file sans être réparée) s'écrit:
Pour ($k = n + s, s \geq 1$) :

$$P_{n+s} = \frac{\frac{\rho^n}{n!} \cdot \frac{\rho^s}{\prod_{m=1}^s (n+m\beta)}}{\sum_{k=0}^n \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^n}{n!} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\rho^s}{\prod_{m=1}^s (n+m\beta)}} \quad (4.1.32)$$

c) L'espérance mathématique (m_k) nombre moyen de demande en attente :

$$m_s = \sum_{s=1}^{\infty} s P_{n+s} = \frac{\frac{\rho^n}{n!} \cdot \sum_{s=1}^{\infty} \frac{s \rho^s}{\prod_{m=1}^s (n+m\beta)}}{\sum_{k=0}^n \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^n}{n!} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\rho^s}{\prod_{m=1}^s (n+m\beta)}} \quad (4.33)$$

Pour obtenir P_H - la probabilité que la pièce défectueuse quitte la file d'attente sans être réparé il faut faire le produit de m_s par

$$P_H = \frac{\beta}{\rho} \cdot \frac{\frac{\rho^n}{n!} \cdot \sum_{s=1}^{\infty} \frac{s \rho^s}{\prod_{m=1}^s (n+m\beta)}}{\sum_{k=0}^n \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^n}{n!} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\rho^s}{\prod_{m=1}^s (n+m\beta)}} \quad (4.34)$$

La probabilité que la pièce entrant dans le système sera servie (réparée) c'est-à-dire la fiabilité du système :

$$Q = 1 - P_H \quad (4.35)$$

4.2.4.2. Système avec files d'attente sans découragement (illimitées):

Si on considère le cas où toutes les pièces défectueuses en attente seront, tôt ou tard, réparées; c'est à dire qu'elles ne quitteront pas la file d'attente, on peut estimer, alors que $\beta \rightarrow 0$; Dans ce cas dans ce type de système il n'y aura pas automatiquement un régime stationnaire d'entretien quand $t \rightarrow \infty$. Le régime stationnaire existera seulement quand $\rho < n$ c'est-à-dire quand le

Chapitre 04 : Utilisation de la théorie des files d'attente et la théorie de Markov pour la résolution des problèmes de disponibilité des installations

nombre moyen de demandes arrivant pendant la réparation d'une pièce ne dépassera pas les capacités n de l'atelier. Dans le cas contraire la file d'attente augmentera indéfiniment. Pour le 1^{er} cas ($\rho < n$) on peut écrire [21-57-58]:

Pour $0 \leq k \leq n$. (Toutes les pièces défectueuses sont servies; il n'y a pas encore de file d'attente);

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^n \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^n}{n!} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\rho^s}{n^s}} \quad (4.36)$$

$$\text{En tenant compte de } \sum_{s=1}^{\infty} \left(\frac{\rho}{n}\right)^s = \frac{\rho}{n-\rho} \quad \text{si } \rho < n \quad (4.37)$$

La formule (4.1.36) devient:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^n \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)}} \quad (4.38)$$

D'où on peut déduire :

$$P_k = \frac{\frac{\rho^k}{k!}}{\sum_{k=0}^n \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)}} \quad (4.39)$$

Pour $k = n + s$; $k > n$; $s \geq 1$ (les stands sont tous occupés, la file d'attente commence à se former)

$$P_{n+s} = \frac{\frac{\rho^{n+s}}{n!n^s}}{\sum_{k=0}^n \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)}} \quad (4.40)$$

L'espérance mathématique m_k ;

Nombre de demande en attente, peut être obtenue à partir de la formule (4.1.32)

Pour $\beta \rightarrow 0$ (tout le monde sera servi):

$$m_s = \frac{\frac{\rho^{n+1}}{n! \left(1 - \frac{\rho}{n}\right)^2}}{\sum_{k=0}^n \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)}} \quad (4.41)$$

Ou bien

$$m_s = \frac{\frac{n \cdot \rho^{n+1}}{n!(n-\rho)^2}}{\sum_{k=0}^n \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)}} \quad (4.42)$$

4.2.5 Application de la théorie des files d'attente dans la base de maintenance de BISKRA

Un stand de réparation est une équipe de réparation qui se déplace sur site pour une demande de réparation qu'elle effectue au niveau de la base de maintenance ou sur site, cette équipe est polyvalente, elle est programmée de réaliser n'importe quel type de réparation (mécanique, électrique et autres...)

Dans notre cas on fait une application dans la base de maintenance de Biskra où la durée de réparation est dépendante de la disponibilité ou de l'indisponibilité de la pièce de rechange, pour cela on aura deux propositions :

Premier cas : en cas de la disponibilité de la pièce de rechange, la machine doit être réparée

Deuxième cas : en cas d'indisponibilité de la pièce de rechange, nous aurons deux propositions,

- la machine quitte la file d'attente avant d'être réparée (avec découragement),
- la machine reste dans la file d'attente (sans découragement).

1^{ier} Cas La pièce de rechange est disponible

- 04 stands (04 équipes) de réparation
- densité de demande $\lambda = 0.025 \text{ h}^{-1}$
- Densité de réparation $\mu = 0.01 \text{ h}$
- nombre moyen de demandes durant le temps de réparation d'une demande $\rho = 2.5$
- La densité d'attente $v = 0$ sans découragement (le temps d'attente est illimité, toutes les machines seront servies à cause de la disponibilité de la pièce de rechange).

2^{ème} cas La pièce de rechange est indisponible

- 04 stands (04 équipes) de réparation
- densité de demande $\lambda = 0.025 \text{ h}^{-1}$
- Densité de réparation $\mu = 0.00833 \text{ h}^{-1}$
- nombre moyen de demandes durant le temps de réparation d'une demande $\rho = 3.01$
- La densité d'attente (v) :
 - $v = 0 \text{ h}^{-1}$ (sans découragement)
 - $v = 0.00333 \text{ h}^{-1}$ (avec découragement)
- nombre moyen d'attente durant le temps de réparation d'une demande (β)
 - $\beta = 0 \text{ h}^{-1}$ pour cas sans découragement
 - $\beta = 0.4 \text{ h}^{-1}$ pour cas avec découragement

Chapitre 04 : Utilisation de la théorie des files d'attente et la théorie de Markov pour la résolution des problèmes de disponibilité des installations

Tableau des résultats :

Les Probabilités		Pièce de rechange disponible	Pièce de rechange indisponible	
			Cas sans découragement*	Cas avec découragement
La probabilité (P_k) d’avoir k stand occupé	P ₀	0,0737	0.0428	0.034
	P ₁	0,184	0,128	0,104
	P ₂	0,23	0,0969	0,1568
	P ₃	0,191	0,1945	0,1574
	P ₄	0,13	0,1463	0,118
La probabilité (P_s) d’avoir tous les stands occupés et S éléments en attente	P ₁	0.0684	0.1176	0.0079
	P ₂	0.065	0.0885	0.004
	P ₃	0.0595	0.066	0.002
	P ₄	0.01	0.0501	0.0015
	P ₅	0.005	0.0377	0.0008
	P ₆	0.00055	0.0283	0.0004
	P ₇	0.0005	0.021	0.00019
	P ₈	0.000323	0.016	0.00008
	P ₉	0.00053	0.012	0.000034
	P ₁₀	0.00034	0.009	0.000012
	P ₁₁	0.00033	0.0068	0.47 10 ⁻⁴
	P ₁₂	0.00054	0.0051	0.16 10 ⁻⁴
	P ₁₃	0.00035	0.0038	0.55310 ⁻⁵
	P ₁₄	0.00033	0.0029	0.17 10 ⁻⁴
(m_s) Nombre moyen de demande en attente		0.528	1.44	7.29 10 ⁻²
(P_H) la probabilité que la pièce défectueuse quitte la file d’attente sans être réparé				7.06 %
(Q) la fiabilité de système				92,93%

Tableau 4.1.Résultats de calcul des files d'attente dans la base de maintenance

Chapitre 04 : Utilisation de la théorie des files d'attente et la théorie de Markov pour la résolution des problèmes de disponibilité des installations

*Remarque : Certaines pièces sont appelées à rester dans les ateliers de réparation en attente de la pièce de rechange.

4.2.5.1 Interprétation des résultats

Nous remarquons que :

- Dans le cas où la durée de réparations n'est pas grande à cause de la disponibilité de la pièce, les probabilités d'avoir k stands occupés (avant qu'il soit tout les stand occupés $0 \leq k \leq 4$) sont plus grande que les probabilités d'attente ce qui nous démontre que le nombre de machine en attente est petit par rapport au cas de l'indisponibilité de la pièce c'est ce qui a été confirmé en calculant (m_s) le nombre des demandes en attente est de 0.528 sans pour autant nier l'existence d'une file d'attente qu'on peut expliquer comme suit :

- 04 équipes de réparation sont insuffisantes.
- la durée de diagnostic de panne est grande.
- manque de personnel qualifié et de matériel adéquat.
- mauvaise planification des interventions.

- Dans le cas où la durée entre de réparation est grande, le nombre de machine en attente est grand en comparaison avec le cas où la pièce de rechange est disponible.

Ainsi, dans le cas où la durée d'attente est limité, 7% des machines quittent le système sans être réparé, ce qui a entraîné la baisse de la fiabilité de ce système jusqu'à 92,93 %.

4.2.6 Conclusion

Dans ces ateliers de réparation, nous nous confrontons à deux contraintes, l'une par le manque de la pièce de rechange pour les anciens équipements (machines), et l'autre par l'insuffisance des équipes de réparations.

Proposition :

- Travailler en étroite collaboration avec la base de maintenance de LAGHOUAT ;
- Une bonne planification des missions d'intervention ;
- Evitez les déplacements inutiles à cause de l'absence de pièce de rechange.
- Meilleure qualification du personnel.

4.3 AMELIORATION DE LA DISPONIBILITE DES GAZODUCS

Le gazoduc est examiné sous l'angle d'un macrosystème composé de 3 sous-systèmes assemblés en série de niveau inférieur :

- les tronçons de canalisation ;
- les stations de compression ;
- les sous-systèmes turbocompresseurs.

Alors la défaillance de chacun représente une rupture d'approvisionnement en gaz, et une défaillance du sous-système de canalisation entraîne l'arrêt complet de la ligne. Pour cela il faut améliorer la disponibilité de tous les sous-systèmes afin d'améliorer la disponibilité de la ligne .

4.3.1 Amélioration de la disponibilité des conduites

4.3.1.1. Conduite d'interconnexion

L'introduction de conduites d'interconnexion entre stations de compression des quatre gazoducs permet une meilleure exploitation des gazoducs (exemple GZ1, GZ2, GZ3 et GZ4)

Cela permet d'avoir un écoulement continu du gaz même si on a une indisponibilité d'un tronçon, grâce à la fermeture et ouverture des vannes qui assure cette fonction.

Donc cette configuration montre que :

Lors de fonctionnement normal, il n'y a aucune anomalie au niveau des deux gazoducs. Les deux stations de compression aspirent des deux gazoducs qui correspondent à chacune d'elles et refoulent aussi dans les mêmes.

Si on a des travaux au niveau de GZ1 à partir du point de sectionnement 2 (voir la figure) ,donc dans ce cas on a qu'à faire intervenir la conduite d'interconnexion qui a pour rôle d'aspirer du GZ1 et de refouler dans le GZ2, en fermant la vanne de refoulement de GZ1 et ouvrant celle de refoulement dans le GZ2. Un autre avantage c'est que si on a une disjonction d'une station de compression qui correspond à l'un des gazoducs on peut permuter entre les stations.

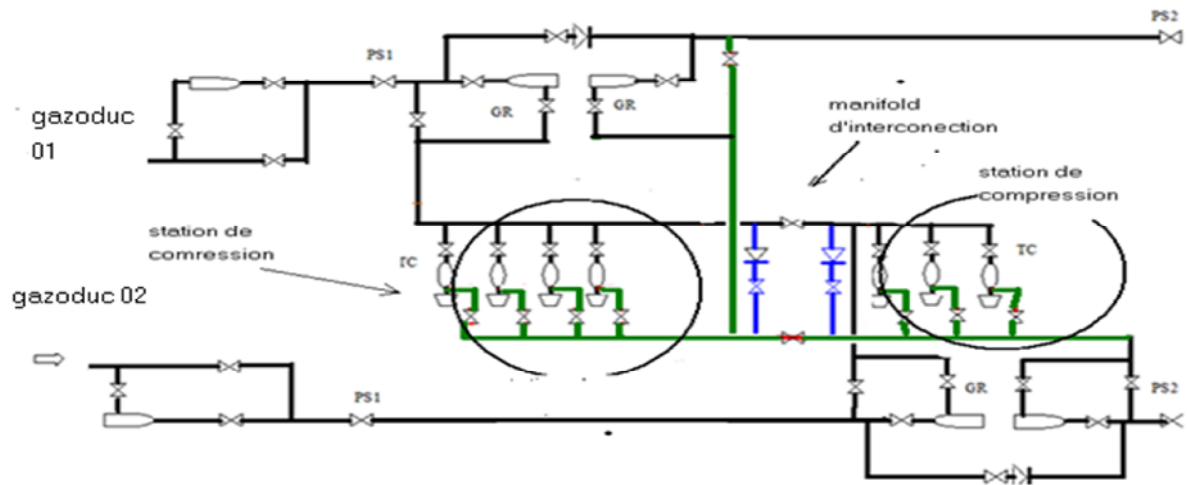


Figure 4.15 Schéma d'interconnexion entre les gazoducs 1 et 2

4.3.1.2 Contrôle et suivi des canalisations

Pour un investissement minimum, l'exploitant d'une canalisation sous protection cathodique pourra régulièrement contrôler le niveau de potentiel électrique de la conduite par rapport au milieu environnant et, de ce fait, être alerté de toute dégradation accidentelle ou modification de l'environnement de la conduite : c'est **la surveillance cathodique**. Il assurera ainsi une longue durée de vie de son réseau et de son investissement .

4.3.1.3. Redondance des tronçons de canalisation du gazoduc

La redondance des tronçons de canalisation se traduit inmanquablement par un bond significatif de la fiabilité du gazoduc. Malheureusement, cette option ne peut être envisagée uniquement comme alternative pour améliorer la fiabilité du gazoduc en raison des coûts assez grands d'une telle opération.

4.3.2 Amélioration de la disponibilité des turbocompresseurs

Une des méthodes connue d'amélioration de la disponibilité est le renforcement par des éléments mis en redondance qui en cas de besoin peuvent remplacer ceux défaillants. La méthode utilisée pour savoir le type de redondance qui donne une bonne disponibilité est la théorie de Markov [24-26]. On compare la disponibilité des 04 propositions suivantes :

4.3.2.1 03 compresseurs parmi 4 en redondance active partielle:

Le système doit fonctionner avec (k = 3) composants parmi (n = 4) composants en marche le système sera défaillant quand il y aura moins de (k = 3) composants en fonctionnement.

L'état absorbant (défaillance du système) correspondra à l'état E_{k-1} (c.-à-d. E_2)

On distingue 02 cas :

4.3.2.1.1 03 Compresseurs parmi 4 avec 01 seul réparateur

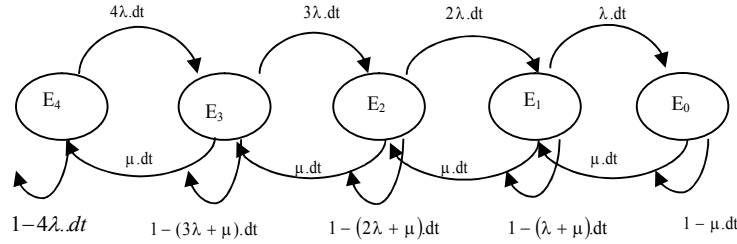


Figure 4.16 Le graphe d'état de la redondance Active (1 réparateur.)

Dans ce cas la disponibilité sera calculé par :

$$A_{3/4} = \frac{\frac{\mu^3}{6\lambda^3} + \frac{\mu^4}{24\lambda^4}}{1 + \frac{\mu}{\lambda} + \frac{\mu^2}{2\lambda^2} + \frac{\mu^3}{6\lambda^3} + \frac{\mu^4}{24\lambda^4}}$$

4.3.2.1.2. 03 compresseurs parmi 4 avec 04 réparateurs :

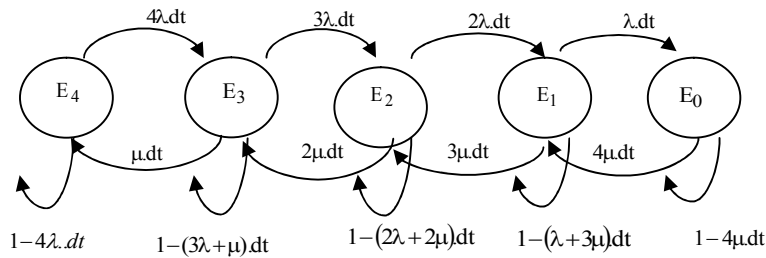


Figure 4.17 Le graphe d'état de la redondance Active (4 réparateurs.)

Dans ce cas la disponibilité sera calculé par :

$$A_{3/4} = \frac{\frac{4\mu^3}{\lambda^3} + \frac{\mu^4}{\lambda^4}}{1 + \frac{4\mu}{\lambda} + \frac{6\mu^2}{\lambda^2} + \frac{4\mu^3}{\lambda^3} + \frac{\mu^4}{\lambda^4}}$$

4.3.2.2 Redondance séquentielle partielle (03 compresseurs parmi 4 et 01 en réserve)

Le système nécessite ($k=3$) composants actifs et dans l'état initial $E_n=4$ on dispose de $(n-k)$ composants de réserve. Dans l'état E_i , il y aura 03 composants actifs dont le taux de défaillance est λ_i et $(i-k)$ 01 composants en réserve, de taux de défaillance λ_0 (qui peut être nul).

L'état absorbant du système est l'état $E_{(k-1)}=E_2$. Le graphe des états autour de l'état E_i

On distingue 02 cas :

4.3.2.2.1 03 compresseurs parmi 4 et 01 en réserve avec 01 seul réparateur

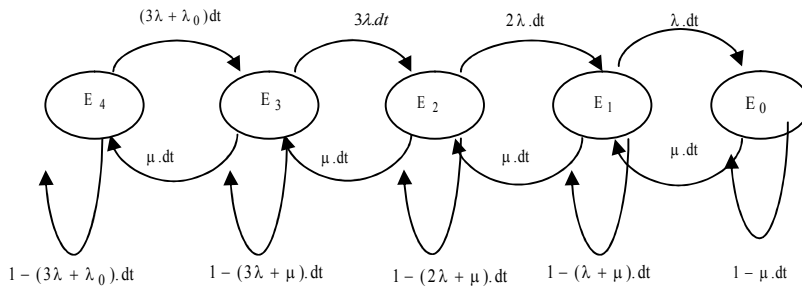


Figure 4.19 Le graphe d'état de la redondance passive a 1 réparateur.

Dans ce cas la disponibilité sera calculé par :

$$A_{3/4} = \frac{\frac{\mu^3}{6\lambda^3} + \frac{\mu^4}{18\lambda^4}}{1 + \frac{\mu}{\lambda} + \frac{\mu^2}{2\lambda^2} + \frac{\mu^3}{6\lambda^3} + \frac{\mu^4}{18\lambda^4}}$$

4.3.2.2.2 03 compresseurs parmi 4 et 01 en réserve avec 04 réparateurs

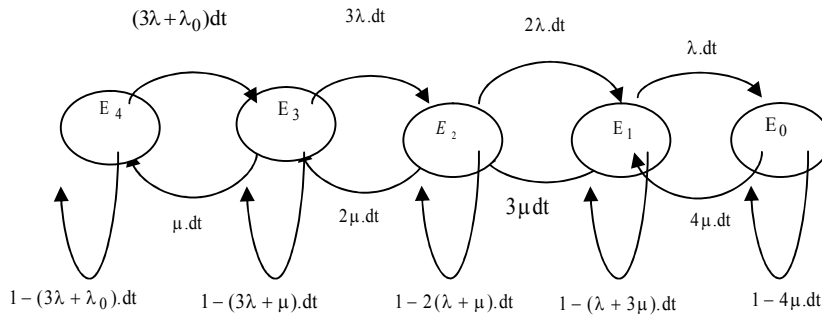


Figure 4.20 Le graphe d'état de la redondance passive avec 04 réparateurs.

Chapitre 04 : Utilisation de la théorie des files d'attente et la théorie de Markov pour la résolution des problèmes de disponibilité des installations

Dans ce cas la disponibilité sera calculé par :

$$A_{3/4} = \frac{\frac{4\mu^3}{\lambda^3} + \frac{4\mu^4}{3\lambda^4}}{1 + \frac{4\mu}{\lambda} + \frac{6\mu^2}{\lambda^2} + \frac{4\mu^3}{\lambda^3} + \frac{4\mu^4}{3\lambda^4}}$$

Résultats

Avec le taux de panne $\lambda = 0.00185$ 1/h, taux de réparation $\mu = 0.0322$ 1/h

Redondance	Active (1 réparateur.)	Passive (1 réparateur)	Active (4 réparateurs)	Passive (4 réparateurs)
Disponibilité	0.987007	0.965135	0.9979	0.972358

Tableau 4.2 Résultats de la disponibilité de machine en redondance.

En comparant la disponibilité pour les 4 cas possibles on trouve :

1. le schéma avec redondance active donne une meilleure disponibilité avec 4 réparateurs qu'avec 1 seul réparateur
2. le schéma avec redondance passive donne une meilleure disponibilité avec 4 réparateurs qu'avec 1 seul réparateur.
3. Mais pour le même nombre de réparateur (c'est-à-dire pour le même atelier de réparation) le schéma avec redondance active est meilleur que celui avec redondance passive .

4.3.3 Amélioration de la disponibilité à la base de la maintenance :

- Constituer un groupe de cadres et de techniciens spécialisé dans le domaine d'exploitation des turbomachines
- Elaborer un programme de maintenance préventive correspondant aux besoins de la ligne.
- Constituer le support d'information pour l'historique
- Travailler en étroite collaboration avec tous les autres services de l'entreprise.
- Assurer un contrôle rigoureux des opérations de maintenance.

4.3.4. La gestion des stocks

On considère un système composé de N machines en exploitation simultanée. Au cours de leur exploitation ces éléments peuvent avoir des défaillances ce qui nécessite des réparations dans un atelier. Pour avoir une continuité de l'exploitation (production) durant l'immobilisation des éléments défaillants on aura besoin d'autres éléments pour les remplacer. Le système nécessite donc un certain nombre d'éléments à avoir en réserve (redondance) afin d'assurer une exploitation continue et dont il faut déterminer le nombre [62-58].

Le maintien d'un matériel dans des conditions de fonctionnement satisfaisantes, le maintien si l'on préfère de sa sûreté de fonctionnement suppose donc que tout composant qui n'est plus conforme à ses spécifications, soit par suite d'un accident, soit du fait de l'usure entraînée par le fonctionnement, soit parce que l'âge a modifié ses caractéristiques, doit être remplacé par un élément neuf, ou à la rigueur reconditionné de façon à retrouver l'intégralité des caractéristiques initiales. Insistons encore sur le fait que cette identité de la pièce de rechange par rapport au composant initial ne se limite pas à sa géométrie, mais comprend toutes les caractéristiques : une pièce mécanique devra être géométriquement identique au plan de définition, mais cette identité inclura aussi la matière utilisée, les traitements thermiques qu'elle subit, l'état de surface etc.

L'utilisateur du bien doit ainsi disposer d'un stock suffisant de composants conformes aux spécifications du constructeur lui permettant de procéder à leur remplacement dans les meilleurs délais, ou à défaut il doit pouvoir les approvisionner très rapidement. La première démarche consistera donc à déterminer dans la liste des composants d'un bien quels sont ceux qui risquent, soit par usure, soit par accident, de ne plus rendre le service que l'on attend d'eux, et à connaître aussi bien que possible les lois qui régissent ces phénomènes d'usure ou de destruction accidentelle.

Dans cette liste des composants susceptibles de subir des défaillances, on pourra alors sélectionner la liste des composants qu'il est nécessaire de posséder en stock pour pouvoir assurer avec une probabilité satisfaisante la permanence de la fonction requise et pour chacun d'entre eux le nombre requis.

Pour cela, on se basera notamment sur les lois d'apparition de défaillances, mais aussi sur l'expérience des utilisateurs et des responsables de maintenance. Nous constaterons alors que ce stock représente en général un investissement significatif, auquel il faut procéder au moment de la fabrication du bien ou de la construction de l'unité de production, si on veut éviter des surcoûts importants ou des délais rédhibitoires (dus par exemple au coût ou aux délais de la remise en fabrication). Ce stock doit être géré tout au long du « cycle de vie » du bien, en respectant un

Chapitre 04 : Utilisation de la théorie des files d'attente et la théorie de Markov pour la résolution des problèmes de disponibilité des installations

équilibre toujours difficile entre la contrainte financière, qui voudrait minimiser la valeur de ce stock improductif (improductif aux yeux des financiers), et la contrainte technique, qui recherche une sûreté de fonctionnement la plus élevée possible, ce qui conduit au contraire à majorer ce stock. un stock de rechanges bien calculé représente presque toujours un capital important, qu'il faut gérer en tenant compte, comme c'est souvent le cas, de deux contraintes parfaitement contradictoires :

- D'une part, maintenir un niveau de stock le plus bas possible, (pour ne pas immobiliser inutilement des capitaux qui seraient tellement plus rentables ailleurs, dira le financier) ;
- D'autre part, assurer un taux satisfaisant de couverture des de délivrance émanant du service maintenance (ou du service production pour les rechanges qu'il est appelé consommer, ledit service production insistant naturellement pour la garantie d'un fonctionnement sans incident de l'outil de production).

Conclusion générale

Le gazoduc est un système complexe, où l'indisponibilité d'approvisionnement de GNL est obligatoire. Les activités de la sûreté de fonctionnement prennent une place de plus en plus essentielle ; tout incident nécessite de prendre les mesures permettant d'assurer le maintien du système considéré à un niveau de fonctionnement satisfaisant et les mesures en question définissent ainsi la stratégie de la politique de maintenance.

Ce travail nous a permis, dans un premier temps d'étudier les principales caractéristiques des systèmes mécaniques qui peuvent influencer le calcul de la fiabilité. Ces caractéristiques peuvent être résumées en quelques points:

- La notion du taux de défaillance constant n'existe pas,
- Le recueil de l'information sur la fiabilité est plus difficile,
- Les défaillances ont des origines très variées (la durée de vie des composants est principalement conditionnée par les problèmes de fatigue avec une forte influence des différentes contraintes),
- Le système mécanique est de plus en plus complexe et performant.
- Un endommagement ou une rupture d'un composant peut entraîner l'arrêt global du système avec des détériorations irréversibles.

Ceci nous a conduit à la présentation graphique des différentes caractéristiques de la fiabilité et de maintenabilité des turbocompresseurs de la ligne Hassi Rmel –Skikda utilisant une étude statistique ou les données sont issues du retour d'expérience, de jugements d'experts et de bases de données en vue de tirer la meilleure qualité d'estimation ,mais nous avons rencontré un vrai problème pour acquérir ces données à cause du manque de l'historique des pannes dans les stations de compression ;

D'après les statistiques recueillies sur les équipements du gazoduc Hassi Rmel - Skikda, les pannes des systèmes des turbocompresseurs suivent une loi de distribution normale c'est à dire qu'ils sont en période de vieillissement.

Ensuite nous avons présenté deux approches pour modéliser la disponibilité des installations des gazoducs (les stations de compressions + les bases de maintenance)

La première approche, couramment utilisée dans le domaine de modélisation de la disponibilité et de la fiabilité des systèmes, est l'approche Markovienne, s'appuyant sur des taux de transition constants pour le passage d'un état à un autre, où nous avons présenté une application pour les

turbocompresseurs des stations de compression nouvelles (exemple d'Ain Naga), ce qui montre que le modèle de processus de dégradation obtenu suit une loi exponentielle.

Aussi nous avons montré l'influence de la disponibilité de la pièce de rechange et la probabilité de non démarrage du turbocompresseur mis en stand-by sur la disponibilité et la fiabilité des turbocompresseurs de la station de compression .

Cela a permis de montrer que la configuration en redondance active 3 +1 (03 compresseurs en marche avec un 1 TC de réserve) reste la meilleure configuration permettant de maximiser la disponibilité.

Chaque type de redondance présente des avantages et des inconvénients :

La redondance active :

Avantage : Meilleure disponibilité ;

Inconvénient : Consommation de combustible ; Usure et réduction de la fiabilité en fonction du temps d'exploitation.

La redondance passive :

Avantage : diminuer le vieillissement des éléments ne travaillant pas.

Inconvénient :

- Risque de non démarrage ;
- Phase de transition dans l'écoulement qui est fonction de durée démarrage
- Risque de défaillance de l'organe de détection de panne et de communication
-

La deuxième approche est la théorie des files d'attente où nous avons montré comment tirer profit des connaissances sur la théorie des chaînes de Markov pour nous aider dans l'analyse des phénomènes d'attente. Nous avons présenté une application sur la base de maintenance de Biskra dans un atelier de réparation où le processus d'arrivée est poissonnien (la durée d'attente entre deux réparations consécutives est exponentielle).

Cette approche nous a permis de montrer l'influence de la disponibilité de la pièce de rechange sur la fiabilité d'un atelier de réparation. Sur la base des résultats obtenus plusieurs propositions seront faites à savoir :

- 1) Intensifier et consolider les bases de maintenance de Biskra et de Laghouat ;
- 2) Créer une interdépendance entre ces 2 bases de maintenance ;
- 3) Développer tous les services de gestions des stocks afin de constituer un nombre optimal et nécessaire de pièces de rechange pour le bon déroulement des réparations aussi bien préventives que curatives.

- 4) Orienter les politiques vers une intensification systématique des installations des équipements en redondance malgré le cout important que cela induit.
- 5) Enfin développer un bon partenariat avec les fournisseurs dans le but de ne pas pénaliser les exploitants en cas de problèmes de fonctionnement.

Bibliographie

- [1] R.LAGGOUNE. L'analyse de retour d'expérience pour l'optimisation de la maintenance dans d'une raffinerie de pétrole (SKIKDA). Cas d'un compresseur .Thèse de magister Université de Boumerdes (1998)
- [2] K.YOUNSI. La modélisation de la fiabilité d'une chaîne GNL dans un environnement faible en données statistiques. Thèse de magister Université de Boumerdes (2002)
- [3] J.C. LIGERON, La fiabilité en mécanique. Ed desforges. .(1979)
- [4] M.BETTAYEB. et autres. Establishment of data base and classification of defects in metal of pipes according to their severity . procedia Engineering vol 42 (2012) pp 666-674
- [5] N.ABDELBAKI et autre. Stusy of defect admissibility in gas pipelines based on fracture .Journal of Engineering Science & Technology(JESTEC). Vol 4 ,N° 1(2009)111-121
- [6] M.ZIANE. Evaluation des indices de fiabilité d'un groupe turbocompresseur. Poste graduation Université de Boumerdès (2006)
- [7] H.DOUMI. L'analyse de la fiabilité structurale du risque de pipe corrodé. Poste graduation Université de Boumerdès (2007).
- [8] B. GNEDENKO, Y BELIAEV, A. SOLOVIEV Méthodes mathématiques en théorie de fiabilité. 1972.
- [9] A. AISSANI. Modèles stochastiques de la théorie de Fiabilité .OPU. 1992. Alger
- [10] A.PAGES, et M. GONDRAN. Fiabilité des systèmes. Ed Eyrolles.(1980).
- [11] A. VILLEMEUR. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : Fiabilité, Facteurs humains et Informatisation. Collection EdF - Ed Eyrolles(1988).
- [12] H.PROCACCIA et autres. Fiabilité deséquipements et théorie de la décision statistique fréquentielle et bayésienne.Ed Eyrolles (1992) .[RADC] RADC T64-50: Reliability Prediction for Mechanical and Electromechanical parts
- [13] J.L. BON. Fiabilité des systèmes: méthodes mathématiques.Ed Masson (1995)..
- [14] A. BIROLINI, Quality and reliability of technical systems.Ed Springer(1997).
- [15] B.AYYUB, .R.MCCUEN. .Probability, Statistics &Reliability for engineers.CRC Press New York. (1997)
- [16] P.HOANG, Handbook of reliability engineering.Ed Springer.(2003
- [17] W.TEBBI. Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés Thèse de doctorat école doctorale d'Angers (2005)

- [18] M.GUIROLT. Première initiation des processus de Markov Revu statistique applique tome 12 n⁰ 03 p 5-14 (1964)
- [19] J.CLAUDEET et A.DELAGE Modélisation de la disponibilité d'un système de transport par chaines de Markov, Revu statistique applique tome 28 n⁰ 03p 45-68 (1980)
- [20] J DOUDIN, E.POMMIES, P.VARRELL. Modélisation stochastique de la maintenance d'une ligne de métro Revu statistique applique tome 35 n⁰ 04(1987) p 37- 53
- [21] B. SERICOLA. Processus de Markov pour la sûreté de fonctionnement et la qualité de service L'Université de Rennes (1998)
- [22] R .DONAT Modélisation de la fiabilité et de la maintenance par des modèles graphique Thèse de Doctorat institut nationale des sciences appliquées de Rouen (2009)
- [23] P. MOYAL Contribution à l'étude des files d'attente avec clients impatient (2005)
- [24] ZWINGMANN. modèle d'évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception Thèse de doctorat l'Université Laval, Québec (2005).
- [25] M .TERRE Chaîne de Markov - Télétrafic - Files d'attente version 05 introduction aux télécommunications
- [26] A.BENMOUNAH. Optimization of Preventive Repair in a Dynamic System of Machines. European Journal of Scientific Research.ISSN 1450-216X Vol.25 No.3 (2009), pp.362-375
- [27] A BENMOUNAH. Markovian Approach of Safety Engineering of a Machines.System European Journal of Scientific Research. ISSN 1450-216X Vol.25 No.3 (2009), pp.488-498.
- [28] A. BENMOUNAH. Research of better reliability and availability of industrial machines. Chisa Prague 2010 P. 7.158
- [29] JF.MAURRAS. *Programmation linéaire, complexité*, Springer, 2002.
- [30] C. LALANNE, Dommage par fatigue - tome 4 Ed Hormes science publication (1999)
- [31] R .LITTLE, J. EKVALL, Statistical analysis of fatigue data. Technical report, American Society for Testing and Materials. (1979).
- [32] R.BARLOW, F. PROSCHAN, Statistical theory of reliability and life testing probability models. Holt Rinehart and Winston. (1965)
- [33] C.VALDEZ-FLORES, R.FELDMAN. survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single unit systems. Naval Research Logistics vol 36, pp 419–446(1989)
- [34] I.B. GERTSBAKH,. Models of preventive maintenance Ed. North-Holond (1977).
- [35] W.Q. MEEKER, L.A. ESCOBAR, statistical methods for reliability data (1998)

- [36] P.LYONNET La Maintenance Mathématiques et méthodes, 3ème Ed. Tec et doc (1992)
- [37] W.P PIERSKALLA, J.A VOELKER. survey of maintenance models : the control and surveillance of deterioration systeme , naval research logistic quarterly vol 23 , pp 353-388 (1979)
- [38] R. CIGOLINI, A. DESHMUKH, L. FEDELE,S. MCCOMB Recent Advances in Maintenance and Infrastructure Management Ed: Springer, (2009)
- [39] DI.CHO et M. PARLAR, Servey of maintenance models for multi unit système , europe&n journal of operation resaerch) vol 51 n 01 pp 1-23 (1991)
- [40] H .PROCACCIA,L. PIEPSZOWNIK, C. CLAROTTI. Fiabilité des équipements et théorie de la décision statistique fréquentielle et bayésienne. Ed Eyrolles(1992)..
- [41] C, Hill. Analyse statistique des données de survie Ed INSERM (1990).
- [42] WJ OWEN et WJ .PADGETT, Accelerated test models for system strength based on birnbaum-saunders distributions Lifetime Data Analysis, vol 5 PP 133-147. (1999)
- [43] R. DOYLE, . Mechanical reliability. In IEEE Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, Tutorial notes, USA(1991).
- [44] CHAPOUILLE P., Fiabilité Maintenabilité, Techniques de l'Ingénieur
- [45] D.-R COX, D .OAKES,. Analysis of survival data. Chapman and Hall. (1984).
- [46] CETIM, La fiabilité en mécanique au service de la qualité Recueil de conférences. Ed CETIM (1989).
- [47] A. PAGES, M .GONDRAN. Fiabilité des systèmes. Ed Eyrolles (1980).
- [48] COCOZZA,C.THIVENT. Processus stochastiques et fiabilité des systèmes. Ed Springer(1997)
- [49] W. TABI et autre Application des Modèles Paramétriques et Semi-Paramétriques d'Essais Accélérés en Mécanique. In *CPI'2001, 2^{ème} Colloque International Conception et Production Intégrées*, Fès, Maroc.
- [50] W. TEBBI *Plan d'essai avec endommagement préalable accéléré appliqué aux composants mécanique. Revue Statistique Appliquée*, ,(2004).
- [51] M.-L. LEEMIS, Probabilistic models and statistical methods inreliability. In IEEE Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, Tutorialnotes, USA. (1994).
- [52] W.TABI *Reliability testing of Mechanical products-Application of statistical accelerated life testing models. In 9th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, University of California, Berkeley, USA.
- [53] C. ROBERT *L'analyse statistique bayé sienne* Edition ECONOMICA. 1992

- [54] C.ROBERT, *The Bayesian choice*. Ed Springer.(2001)
- [55] AFNOR-UTE, *Fiabilité maintenabilité, disponibilité*, 1988.
- [56] J.F. PHELIZON. *Méthodes et modèles de la recherche opérationnelle*, Economica, (1998).
- [57] F. INNAL, Y. DUTUIT . *Evaluation de la performance d'un système de production et des contributions individuelles de ses unités constitutives*”. – Conférence Francophone de Modélisation et Simulation - MOSIM’06 Rabat –Maroc.2006
- [58] M. GIRAUD “*Sûreté de fonctionnement des systèmes. Étude expérimentale des lois de la fiabilité*”. E 3 854 “Techniques de l’ingénieur” Introduction `à la modélisation des réseaux. M. Petitot 22 novembre 2006
- [59] A .N.TERENTIEV. *Reliability of the turbocompressors*. (in russian) Moscow.1979
- [60] P. MAILLÉ . *Notions de fiabilité, MTBF, MTTR, disponibilité*. www.enst-bretagne.fr
- [61] V.M.AKIMOV. *Osnovi nadejnosti gazoturbinih dvigatelei*. (in russian) Moscou.1981
- [62] R. FAVRE .,B. LEMAIRE . *Précis de recherche opérationnelle*, Dunod, 2000
- [63] NOBERT Y., OUELLET R., PARENT R., *La recherche opérationnelle*, Gaetan Morin,(1995).
- [64] J.F. PHELIZON . *Méthodes et modèles de la recherche opérationnelle*, Economica, (1998).

ANNEXE

Indices composés.

Ces indices font partie des caractéristiques de maintenabilité. On distingue:

1. Coefficient de disponibilité du mécanisme.

$$K_{\text{disp.}} = \frac{\sum \text{TBF}}{\sum \text{TBF} + \sum \text{TTR}} \quad (1)$$

C'est la probabilité que la machine, avec tous ses auxiliaires, serait en état de fonctionnement dans l'intervalle de temps choisi ; mis à part le temps des réparations planifiées.

2. Coefficient d'utilisation technique.

$$K_{u.t} = \frac{\sum \text{TBF}_i}{\sum \text{TBF}_i + \sum \text{TTR}_i + \sum \text{TRP}_i} = \frac{\sum \text{TBF}_i}{T_{\text{tot}} - \sum \text{TR}} \quad (2)$$

3. Coefficient de disponibilité opérationnelle.

$$K_{\text{disp.op.}} = \frac{\sum \text{TBF}_i + \sum \text{TR}_i}{T_{\text{tot}}} \quad (3)$$

4. Coefficient de disponibilité mécanique.

C'est la probabilité que la machine se trouve, à tout moment, en état de fonctionnement ou est prête à fonctionner dans les conditions données d'exploitation.

$$K_{\text{disp}}^{\text{mec}} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \quad (4)$$

Où

$$\text{MTBF} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^N \text{TBF}_i$$

n - nombre total de pannes dont les causes sont mécaniques.

$$\text{MTTR} = \frac{1}{r} \cdot \sum_{i=1}^r \text{TTR}_i$$

r - nombre total de réparations non planifiées et dont les causes sont mécaniques

ANNEXE**Année 2003**

	TC	T.B.F.	T. réserve	Arrêt forcé	T arrêt programmé.	Nombre de démarrage	Durée de Démarrage	Nombre de Panne	<i>Nombre de Réparation</i>
S.C 1	3	4412,55	4137,15	124,30	85,2	70	63	2	1
	4	2574,25	4962,25	1200	23,10	86	29,54	4	2
	3	3510,55	3422,10	0,00	410,55	54	65	0	0
	4	2358,25	4594	0	391,35	60	39,18	0	0
S.C 2	1	3659,25	5062,2	0,00	38,15	72	50,48	0	0
	2	4329,5	2437,10	1920,00	73,00	85	50,54	6	2
	1	3497,35	3302,45	0,00	543,40	65	35,48	0	0
	2	2029,55	3000,10	260,00	2053,55	59	34,24	3	2
S.C 3	1	5035,25	3567,05	148,00	9,20	42	119,48	1	2
	2	493,05	300,00	7966,55	0,00	45	10,54	5	4
	3	4571,3	4146,20	25,10	17	82	55,42	1	1
	4	5530,45	3026,45	0	2,30	43	133,12	0	0
S.C 4	1	4172,4	3148,05	2,00	1437,15	50	83,24	1	1
	2	5181,15	1005,45	2570,00	0,00	39	132,48	4	3
	3	3445	2427,05	2,00	2885,55	74	46,30	1	1
	4	1871,3	1136,55	4544,3	1207,05	33	56,42	7	4
S.C 5	1	3173,06	4149,1	89,05	604,40	94	33,42	1	3
	2	2139	5233,50	38,00	605,40	131	16,18	2	4
	3	3925,25	1470,35	2620,00	0,00	57	68,54	3	2
	4	4092,45	3558,05	148	217,1	80	51,06	2	3

ANNEXE**Année 2003**

	TC	T.Total	%T.B.F	%T.RES.	%T.R.N.P.	%T.R.P.	K.ut	K.disp.	K.disp. oper.	K	M.T.B.F.	M.T.T.R.	M.T.R.P.
S.C 1	3	8759,2	50,38	47,23	1,42	0,97	0,95	0,97	0,98	15,86	2206,28	62,15	85,20
	4	8759,6	29,39	56,65	13,70	0,26	0,68	0,68	0,86	33,41	643,563	300,00	11,55
	3	7343,2	47,81	46,60	0,00	5,59	0,90	1,00	0,94	15,38			
	4	7343,6	32,11	62,56	0,00	5,33	0,86	1,00	0,95	25,44			
S.C 2	1	8759,6	41,77	57,79	0,00	0,44	0,99	1,00	1,00	19,68			
	2	8759,6	49,43	27,82	21,92	0,83	0,68	0,69	0,77	19,63	721,583	320,00	36,50
	1	7343,2	47,63	44,97	0,00	7,40	0,87	1,00	0,93	18,59			
	2	7343,2	27,64	40,86	3,54	27,97	0,47	0,89	0,68	29,07	676,517	86,67	1026,78
S.C 3	1	8759,5	57,48	40,72	1,69	0,11	0,97	0,97	0,98	8,34	5035,25	148,00	4,60
	2	8759,6	5,63	3,42	90,95	0,00	0,06	0,06	0,09	91,27	98,61	1593,31	0,00
	3	8759,6	52,19	47,33	0,29	0,19	0,99	0,99	1,00	17,94	4571,3	25,10	17,00
	4	8559,2	64,61	35,36	0,00	0,03	1,00	1,00	1,00	7,78			
S.C 4	1	8759,6	47,63	35,94	0,02	16,41	0,74	1,00	0,84	11,98	4172,4	2,00	1437,15
	2	8756,6	59,17	11,48	29,35	0,00	0,67	0,67	0,71	7,53	1295,29	642,50	0,00
	3	8759,6	39,33	27,71	0,02	32,94	0,54	1,00	0,67	21,48	3445	2	2885,55
	4	8759,2	21,36	12,98	51,88	13,78	0,25	0,29	0,34	17,63	267,329	649,186	301,76
S.C 5	1	8015,6	39,59	51,76	1,11	7,54	0,82	0,97	0,91	29,62	3173,06	89,05	201,47
	2	8015,9	26,68	65,29	0,47	7,55	0,77	0,98	0,92	61,24	1069,5	19,00	151,35
	3	8015,6	48,97	18,34	32,69	0,00	0,60	0,60	0,67	14,52	1308,42	873,33	0,00
	4	8015,6	51,06	44,39	1,85	2,71	0,92	0,97	0,95	19,55	2046,23	74,00	72,37

ANNEXE

Année 2004

	TC	T.B.F.	T.RES	T.R.N.P.	T.R.P.	Nombre de Démarrage	Durée de Démarrage	Nombre de Panne	Nombre de Réparation
S.C 1	1	1427,5	5906,4	0,00	1449,30	27	52,5	0	0
	2	1424,2	5557,50	1105,15	696,35	32	44,3	1	2
	3	1791,55	6900,05	0,20	91,4	25	71,4	1	1
	4	687,25	6299,45	1158,05	638,45	7	98,1	4	2
S.C 2	1	1422,5	6872,35	7,30	481,00	26	54,45	1	1
	2	467	2696,15	1464,00	4156,45	11	42,25	5	2
	3	1421,45	6413,40	84,35	864	16	88,55	1	1
	4	1597,2	4546,25	899,05	1741,10	20	79,55	3	2
S.C 3	1	1651,2	6593,35	0,00	539,05	15	110,05	0	0
	2	0,35	4796,55	1464,00	2522,3	1	0,35	5	2
	3	1456,05	7323,55	0,00	4	7	208	0	0
	4	864,3	5894,2	12,1	2013	11	78,35	1	1
S.C 4	1	1652,5	6341,35	399,40	389,55	17	97,15	2	1
	2	2547,55	4290,30	734,05	1211,30	15	169,5	2	2
	3	934,2	6568,35	513,45	767,20	33	28,20	1	2
	4	328,4	5904,05	1803,45	747,3	16	20,3	6	3
S.C 5	1	1109,45	6402,4	330,05	941,30	19	58,25	2	1
	2	1319,15	6341,15	493,50	629,40	25	52,45	1	1
	3	1408,4	6233,55	407,10	734,14	15	93,55	3	1
	4	830,1	5571,35	1172,15	1210,1	23	36	5	2

ANNEXE**Année 2004**

	TC	T. Total	%T.B.F	%T.RES	%T.R.N.P.	%T.R.P	K.ut	K.disp.	K.disp.oper.	K	M.T.B.F.	M.T.T.R.	M.T.R.P.
S.C 1	1	8783,20	16,25	67,25	0,00	16,50	0,50	1,00	0,83	18,91			
	2	8783,20	16,22	63,27	12,58	7,93	0,44	0,56	0,79	22,47	1424,2	1105,15	348,18
	3	8783,20	20,40	78,56	0,00	1,04	0,95	1,00	0,99	13,95	1791,55	0,20	91,40
	4	8783,20	7,82	71,72	13,18	7,27	0,28	0,37	0,80	10,19	171,813	289,51	319,23
S.C 2	1	8783,15	16,20	78,24	0,08	5,48	0,74	0,99	0,94	18,28	1422,5	7,30	481,00
	2	8783,60	5,32	30,70	16,67	47,32	0,08	0,24	0,36	23,55	93,4	292,80	2078,23
	3	8783,20	16,18	73,02	0,96	9,84	0,60	0,94	0,89	11,26	1421,45	84,35	864,00
	4	8783,60	18,18	51,76	10,24	19,82	0,38	0,64	0,70	12,52	532,4	299,68	870,55
S.C 3	1	8783,60	18,80	75,06	0,00	6,14	0,75	1,00	0,94	9,08			
	2	8783,20	0,00	54,61	16,67	28,72	0,00	0,00	0,55	2857,14	0,07	292,80	1261,15
	3	8783,60	16,58	83,38	0,00	0,05	1,00	1,00	1,00	4,81			
	4	8783,60	9,84	67,10	0,14	22,92	0,30	0,99	0,77	12,73	864,3	12,10	2013,00
S.C 4	1	8782,80	18,82	72,20	4,55	4,44	0,68	0,81	0,91	10,29	826,25	199,70	389,55
	2	8783,20	29,00	48,85	8,36	13,79	0,57	0,78	0,78	5,89	1273,78	367,03	605,65
	3	8783,20	10,64	74,78	5,85	8,73	0,42	0,65	0,85	35,32	934,2	513,45	383,60
	4	8783,20	3,74	67,22	20,53	8,51	0,11	0,15	0,71	48,72	54,7333	300,575	249,10
S.C 5	1	8783,20	12,63	72,89	3,76	10,72	0,47	0,77	0,86	17,13	554,725	165,03	941,30
	2	8783,20	15,02	72,20	5,62	7,17	0,54	0,73	0,87	18,95	1319,15	493,50	629,40
	3	8783,19	16,04	70,97	4,63	8,36	0,55	0,78	0,87	10,65	469,467	135,70	734,14
	4	8783,70	9,45	63,43	13,34	13,78	0,26	0,41	0,73	27,71	166,02	234,43	605,05

ANNEXE

Année 2005

	TC	T.B.F.	T. réserve	Arrêt forcé	T arrêt programmé.	Nombre de démarrage	Durée de Démarrage	Nombre de Panne	Nombre de Réparation
S.C 1	1	1762,30	5547,95	0,00	1449,35	22	110,05	0	2
	2	307,05	4791,90	2913,25	747,00	26	0,35	6	2
	3	1356,25	6974,35	7,45	421,15	12	208	2	1
	4	834,00	5880,55	37,05	2008,00	15	78,35	4	3
S.C 2	1	1365,50	7058,65	3,30	332,15	13	97,15	2	2
	2	510,00	3704,85	1327,30	3217,45	33	169,5	5	2
	3	1423,55	6684,50	85,10	566,05	10	28,20	1	2
	4	1308,20	5527,97	712,15	1211,30	18	20,3	2	3
S.C 3	1	1329,40	7337,10	0,25	92,45	7	10,54	1	1
	2	1296,15	6514,65	84,05	864,35	17	55,42	1	2
	3	1800,1	5453,40	0,00	1506,10	16	133,12	0	3
	4	690,35	5653,35	1205,20	1210,30	20	83,24	4	3
S.C 4	1	1596,50	7158,95	0,00	4,15	3	132,48	0	1
	2	2493,55	4979,10	0,00	1286,55	15	46,30	0	2
	3	935,05	7161,85	49,20	613,50	18	56,42	1	1
	4	331,40	6402,6	12,15	2013,45	20	33,42	1	3
S.C 5	1	1208,45	6305,70	478,05	767,00	14	16,18	2	2
	2	1054,15	6812,10	263,55	629,40	13	68,54	1	2
	3	1300,40	61119,45	592,10	747,25	15	51,06	3	2
	4	720,10	5697,30	1219,10	1123,10	21	10,54	5	3

ANNEXE

Année 2005

	TC	T.Total	% T.B.F.	%T.RES.	%T.R.N.P	%T.R.P.	K.ut	K.disp.	K.disp.oper.	K	M.T.B.F.	M.T.T.R.	M.T.R.P.
S.C 1	1	8759,60	20,12	63,34	0,00	16,55	0,55	1,00	0,83	12,48			724,68
	2	8759,20	3,51	54,71	33,26	8,53	0,08	0,10	0,58	84,68	51,175	485,54	373,50
	3	8759,20	15,48	79,62	0,09	4,81	0,76	0,99	0,95	8,85	678,125	3,725	421,15
	4	8759,60	9,52	67,13	0,42	22,92	0,29	0,96	0,77	17,99	208,5	9,26	669,33
S.C 2	1	8759,60	15,59	80,58	0,04	3,79	0,80	1,00	0,96	9,52	682,75	1,65	166,08
	2	8759,60	5,82	42,29	15,15	36,73	0,10	0,28	0,48	64,71	102	265,46	1608,73
	3	8759,20	16,25	76,31	0,97	6,46	0,69	0,94	0,93	7,02	1423,55	85,1	283,03
	4	8759,62	14,93	63,11	8,13	13,83	0,40	0,65	0,78	13,76	654,1	356,08	403,77
S.C 3	1	8759,20	15,18	83,76	0,00	1,06	0,93	1,00	0,99	5,27	1329,4	0,25	92,45
	2	8759,20	14,80	74,37	0,96	9,87	0,58	0,94	0,89	13,12	1296,15	84,05	432,18
	3	8759,60	20,55	62,26	0,00	17,19	0,54	1,00	0,83	8,89			502,03
	4	8759,60	5,82	42,29	15,15	36,73	0,10	0,28	0,48	64,71	102	265,46	1608,73
S.C 4	1	8759,20	7,88	64,54	13,76	13,82	0,22	0,36	0,72	28,97	172,588	301,30	403,43
	2	8759,20	28,47	56,84	0,00	14,69	0,66	1,00	0,85	6,02			643,28
	3	8759,60	10,67	81,76	0,56	7,00	0,59	0,95	0,92	19,25	935,05	49,2	613,50
	4	8759,60	3,78	73,09	0,14	22,99	0,14	0,96	0,77	60,35	331,4	12,15	671,15
S.C 5	1	8759,20	13,80	71,99	5,46	8,76	0,49	0,72	0,86	11,59	604,225	239,03	383,50
	2	8759,20	12,03	77,77	3,01	7,19	0,54	0,80	0,90	12,33	1054,15	263,55	314,70
	3	63759,20	2,04	95,86	0,93	1,17	0,49	0,69	0,98	11,53	433,467	197,37	373,63
	4	8759,60	8,22	65,04	13,92	12,82	0,24	0,37	0,73	29,16	144,02	243,82	374,37

ANNEXE

Année 2006

		T.B.F.	T.RES	T.R.N.P.	T.R.P.	Nombre de démarrage	Durée de démarrage	Nombre de panne	Nombre de réparation
SC 1	1	4423,35	3723,45	0,00	612,40	58	32,19	0	1
	2	2189,05	2682,30	1413,00	2475,25	72	50,48	5	3
	3	2916,55	5323,00	0,00	520,05	49	82,27	0	2
	4	5799,25	2427,85	205,15	327,35	103	41,18	3	1
SC 2	1	4009,5	4057,75	677,05	15,30	37	27,54	3	1
	2	3768,55	2974,65	2016,00	0,00	25	29,12	6	0
	3	4712,3	3757,45	0,00	289,45	36	132,48	0	3
	4	1937,15	6672,8	126,25	23,00	25	54,24	4	1
SC 3	1	5020,55	1947,6	5,05	1786,00	64	76,24	2	5
	2	4217,05	4449,85	0,00	92,30	22	19,06	0	1
	3	3256,3	927,80	3547,55	1027,55	89	30,38	6	3
	4	6999,45	1001,75	135	605,40	56	38,15	2	2
SC 4	1	3887,4	1913,5	2958,30	0,00	37	83,24	5	0
	2	5636,45	1470,70	1652,45	0,00	36	68,54	3	0
	3	2446	5112,70	0,00	1200,50	49	133,00	0	4
	4	2009,3	6410,15	0	340,15	44	106,48	0	1
SC 5	1	4213,06	4230,99	102,05	213,10	59	41,18	2	2
	2	3325,25	4863,05	69,30	502,00	34	10,54	1	3
	3	1804,5	3522,70	3432,00	0,00	75	51,18	5	0
	4	4076,55	3311,65	1152,05	219,35	66	64,06	2	2

ANNEXE

Année 2006

	TC	T.Total	%T.B.F	%T.RES.	%T.R.N.P.	T.R.P.	K.ut	K.disp.	K.disp.op	K	M.T.B.F.	M.T.T.R.	M.T.R.P.
SC 1	1	8759,20	50,50	42,51	0,00	6,99	0,88	1,00	0,93	13,11			612,40
	2	8759,60	24,99	30,62	16,13	28,26	0,36	0,61	0,56	32,89	437,81	282,60	825,08
	3	8759,60	33,30	60,77	0,00	5,94	0,85	1,00	0,94	16,80			260,03
	4	8759,60	66,20	27,72	2,34	3,74	0,92	0,97	0,94	17,76	1933,08	68,38	327,35
SC 2	1	8759,60	45,77	46,32	7,73	0,17	0,85	0,86	0,92	9,23	1336,5	225,68	15,30
	2	8759,20	43,02	33,96	23,02	0,00	0,65	0,65	0,77	6,63	628,092	336,00	
	3	8759,20	53,80	42,90	0,00	3,30	0,94	1,00	0,97	7,64			96,48
	4	8759,20	22,12	76,18	1,44	0,26	0,93	0,94	0,98	12,91	484,288	31,56	23,00
SC 3	1	8759,20	57,32	22,23	0,06	20,39	0,74	1,00	0,80	12,75	2510,28	2,53	357,20
	2	8759,20	48,14	50,80	0,00	1,05	0,98	1,00	0,99	5,22			92,30
	3	8759,20	37,18	10,59	40,50	11,73	0,42	0,48	0,48	27,33	542,717	591,26	342,52
	4	8741,60	80,07	11,46	1,54	6,93	0,90	0,98	0,92	8,00	3499,73	67,50	302,70
SC 4	1	8759,20	44,38	21,85	33,77	0,00	0,57	0,57	0,66	9,52	777,48	591,66	
	2	8759,60	64,35	16,79	18,86	0,00	0,77	0,77	0,81	6,39	1878,82	550,82	
	3	8759,20	27,92	58,37	0,00	13,71	0,67	1,00	0,86	20,03			300,13
	4	8759,60	22,94	73,18	0,00	3,88	0,86	1,00	0,96	21,90			340,15
SC 5	1	8759,20	48,10	48,30	1,17	2,43	0,93	0,98	0,96	14,00	2106,53	51,03	106,55
	2	8759,60	37,96	55,52	0,79	5,73	0,85	0,98	0,93	10,22	3325,25	69,30	167,33
	3	8759,20	20,60	40,22	39,18	0,00	0,34	0,34	0,61	41,56	360,9	686,40	
	4	8759,60	46,54	37,81	13,15	2,50	0,75	0,78	0,84	16,19	2038,28	576,03	109,68

Résumé

Dans ce travail, Nous présentons les caractéristiques des systèmes mécaniques ayant un effet direct sur l'évaluation de leur fiabilité, et les principales méthodes d'évaluation de la fiabilité mécanique.

Ensuite, nous présentons deux approches pour l'évaluation de la disponibilité, la première est le processus de Markov et la deuxième c'est la théorie des files d'attente.

Ces deux domaines d'évaluation consiste en une évaluation probabiliste, et les modèles utilisés sont basés principalement sur les processus de Markov. Nous envisageons ensuite la nécessité de les améliorer dans le but d'augmenter la productivité des machines et mettre en œuvre des moyens adéquats pour y arriver.

On fera ensuite une évaluation des capacités de réparations de la base de maintenance installée à Biskra.

Enfin, nous proposons une méthode d'amélioration de la fiabilité et de la disponibilité des installations. Cette méthode porte sur le renforcement par des éléments mis en redondance, qui, en cas de besoin, peuvent remplacer ceux défectueux.

Mots clefs: F.M.D, Chaines de Markov, Files d'attentes, Redondance.

Abstract:

In this work, we're going to present the characteristics of mechanical systems which has a direct effect on assessing their reliability. Then, we'll go through the main methods of assessing the mechanical reliability.

Afterwards, we'll present two approaches concerning the assessment and the availability, the first one is about Queuing theory, and the second one is about Markov process, these two fields of assessment, we talk here about probability assessment, and the used models are based essentially on Markov process. And to judge then the necessity to improve them, with the aim of raising the productivity of machines, using an adequate means to get there.

Finally, we'll suggest one of the methods used to improve the reliability and the availability of facilities. This method is about strengthening, by spare elements that can replace faulty ones, in case of necessity.

Key words: reliability, availability, maintainability Markov process Queuing theory

ملخص:

سنعرض في هذا العمل، خصائص الأنظمة الميكانيكية التي لها أثر مباشر على تقييم نجاعتها. كما سنستعرض الطرق الأساسية لتقييم النجاعة الميكانيكية.

بعد ذلك، سنتطرق إلى مقاربتين حول تقييم الجاهزية، نتحدث الأولى عن نظرية طابور الانتظار، و الثانية عن عملية ماركوف، و مجالاً التقييم هاتين الأخيرتين هو تقويم احتمالي، و تركز الطرق المستعملة أساساً على عملية ماركوف. و من أجل الحكم على مدى ضرورة تحسينهما بهدف الرفع من إنتاجية الآلات و استخدام الوسائل المناسبة للوصول إلى ذلك. و في النهاية، سنقترح إحدى طرق تحسين نجاعة و جاهزية المنشآت، بتعزيزها بعناصر إضافية يمكنها أن تحل محل العناصر المعطوبة عند الحاجة.

الكلمات المفتاحية: النجاعة، الجاهزية، الصيانة. نظرية طابور الانتظار عملية ماركوف.